

Grado en Ingeniería Mecánica
2018-2019

Trabajo Fin de Grado

“Evaluación mediante simulación numérica de un dispositivo de ensayo multiaxial para sólidos hiperelásticos”

Jorge Rodríguez Cabrero

Tutores:

Jesús Pernas Sánchez

Álvaro Vaz Romero Santero

Leganés, febrero de 2019



Esta obra se encuentra sujeta a la licencia Creative Commons **Reconocimiento
– No Comercial – Sin Obra Deriva**

RESUMEN

En este trabajo se va a realizar un primer análisis del funcionamiento de un dispositivo de ensayo multiaxial para sólidos hiperelásticos. Además, se ha diseñado un sistema de sujeción de la muestra que permite una preparación más sencilla de los ensayos y la posibilidad de realizar ensayos uniaxiales.

El estudio de este tipo de materiales es especialmente complejo debido a las grandes deformaciones a las que pueden llegar a verse sometidos. Encontramos sólidos hiperelásticos en multitud de aplicaciones industriales y médicas, por tanto, es una tarea crítica caracterizarlos de manera precisa.

El proceso comienza con el diseño 3D de los elementos que componen la máquina de ensayo y del nuevo sistema de anclaje que, mediante el uso de imanes, permite una colocación más sencilla de la muestra.

Posteriormente, se ha llevado a cabo un estudio en el que se ha empleado un software de elementos finitos que nos ha permitido predecir de manera precisa el comportamiento tanto del material ensayado como de la propia máquina de ensayos.

El proceso de simulación se ha comenzado partiendo de un modelo básico del problema al que se ha ido añadiendo complejidad hasta reflejar, de manera fiel, el funcionamiento real del dispositivo. En una segunda fase se han aplicado una serie de simplificaciones geométricas con el objetivo de determinar el impacto que estas tendrían sobre el coste computacional del problema.

Observando los resultados obtenidos se ha determinado el lugar óptimo para posicionar una banda extensiométrica en el dispositivo de ensayo que permitirá, indirectamente, recoger los valores de tensión que se generan durante el ensayo y se ha validado el diseño y funcionamiento del dispositivo para ser utilizado en futuras investigaciones.

Palabras clave: Máquina de ensayo, hiperelasticidad, ensayo equiaxial.

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN.....	9
1.1 Motivaciones	10
1.2 Objetivos.....	12
1.3 Fases del desarrollo	13
1.4 Marco regulador	14
2. ESTADO DEL ARTE	15
2.1 Polímeros y clasificación.....	16
2.2 Hiperelasticidad	20
2.3 Máquina de ensayo multiaxial.....	21
2.4 Método de elementos finitos.....	24
3. PROCEDIMIENTO.....	27
3.1 Diseño del modelo 3D	28
3.2 Planteamiento del problema	29
3.3 Análisis de elementos finitos	29
3.3.1 Definición y simplificación del problema	29
3.3.2 Análisis del mallado	35
3.3.3 Propiedades de los materiales	42
3.4 Diseño del sistema de sujeción.....	44
4. RESULTADOS	47
4.1 Análisis de los resultados	48
5. CONCLUSIONES Y PROPUESTAS DE INNOVACIÓN	58
5.1 Conclusiones.....	59
5.2 Propuesta de innovación.....	59
6. ENTORNO SOCIOECONÓMICO	61
6.1 Presupuesto	62

6.2 Impacto socioeconómico	63
7. BIBLIOGRAFÍA	65
8. ANEXOS	67
8.1 Planos.....	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Junta homocinética [1]	10
Figura 2. Colocación stent [2]	11
Figura 3. Detalle del sistema de sujeción	12
Figura 4. Ejemplos de polímeros [4]	16
Figura 5. Influencia de la temperatura en el comportamiento [5]	17
Figura 6. Tipos de modelado [5]	17
Figura 7. Ejemplo fibra de carbono [7]	18
Figura 8. Ejemplos de uso [9].....	19
Figura 9. Obtención del látex [10].....	19
Figura 10. Comportamiento material hiperelástico [3]	21
Figura 11. Máquina de ensayo [12]	22
Figura 12. Máquina de ensayo de gran tamaño [12]	22
Figura 13. Bandas extensiométricas [13]	23
Figura 14. Máquina de ensayo [12]	24
Figura 15. Soportes.....	28
Figura 16. Modelo de la muestra.....	30

Figura 17. Esquema de la aplicación de las cargas.....	30
Figura 18. Mallado preliminar.....	31
Figura 19. Carga radial	31
Figura 20. Cargas reference point.....	32
Figura 21. Cargas semicírculo	33
Figura 22. Cargas círculo $\frac{1}{4}$	34
Figura 23. Cargas círculo $\frac{1}{18}$	34
Figura 24. Mallado preliminar.....	35
Figura 25. Distribución de tensiones en dirección radial	36
Figura 26. Detalle de zonas de mallado.....	37
Figura 27. Condiciones de contorno soporte	38
Figura 28. Mallado soporte.....	39
Figura 29. Ubicación de la banda extensiométrica.....	40
Figura 30. Mallado cuerpo de la máquina	41
Figura 31. Condiciones de contorno del cuerpo de la máquina.....	41
Figura 32. Hiperelástico uniaxial.....	43
Figura 33. Hiperelástico biaxial.....	43
Figura 34. Mordaza.....	44

Figura 35. Conjunto de agarre	45
Figura 36. Velocidades de impresión	46
Figura 37. Distribución de tensiones en dirección radial	49
Figura 38. Tensiones radiales simplificación un medio	49
Figura 39. Tensiones radiales simplificación un decimotavo.....	50
Figura 40. Tiempos de simulación	50
Figura 41. Tendencia de los tiempos de simulación.....	51
Figura 42. Evolución de la tensión a lo largo del diámetro	52
Figura 43. Detalle de la recta objeto de ensayo	52
Figura 44. Evolución de la tensión a lo largo del diámetro ensayo uniaxial.....	53
Figura 45. Detalle de la recta objeto de ensayo	53
Figura 46. Tensión en función de la expansión	54
Figura 47. Fuerza en el caso equiaxial	55
Figura 48. Fuerza en el caso uniaxial	55
Figura 49. Distribución de tensiones en el soporte.....	56
Figura 50. Localización de la banda extensiométrica.....	56
Figura 51. Tensiones en el cuerpo del dispositivo.....	57

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Diagrama de Gant.....	14
Tabla 2. Parámetros de la simulación.....	29
Tabla 3. Número de elementos del mallado	37
Tabla 4. Propiedades mecánica metacrilato [14]	42
Tabla 5. Propiedades del látex [15]	42
Tabla 6. Parámetros de impresión	45
Tabla 7. Tensiones en las distintas simplificaciones	48
Tabla 8. Gasto en personal	62
Tabla 9. Gasto en equipos.....	62
Tabla 10. Gasto en impresión.....	63
Tabla 11. Coste total.....	63

1. INTRODUCCIÓN

En este primer capítulo, a modo de introducción del proyecto, se exponen las motivaciones para su realización, los principales objetivos que se pretenden alcanzar y las fases en las que se ha desarrollado el estudio.

1.1 Motivaciones

El tipo de materiales en el que se centra el estudio son los denominados como elastómeros. Su uso en la actualidad está muy extendido desde el siglo XIX pudiendo encontrarse en objetos tan cotidianos como un biberón; juntas herméticas, debido a que son relativamente blandas y deformables permitiendo una gran adaptabilidad y capacidad de sellado; las juntas tóricas o en las juntas homocinéticas de los automóviles.



Figura 1. Junta homocinética [1]

Este material también está especialmente extendido en el ámbito higiénico/sanitario. En particular son muy utilizados para la fabricación de preservativos y material quirúrgico como guantes.

Además, tiene una gran importancia en intervenciones como la angioplastia. En este tipo de intervención se aumenta el diámetro de una arteria obstruida mediante el uso de una malla metálica tal y como se describe en la figura 2. El tejido arterial se puede modelizar de manera simplificada como un elastómero, por lo que es de vital importancia poder ensayar y obtener modelos precisos de las propiedades mecánicas de este tipo de materiales.

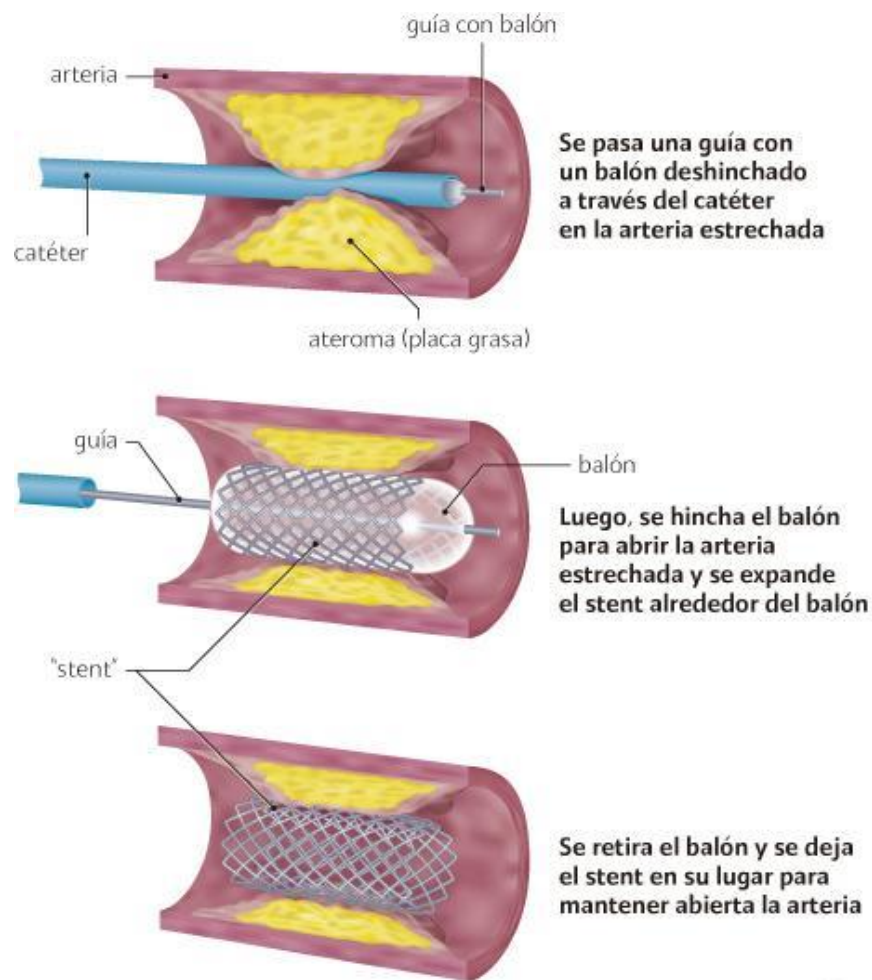


Figura 2. Colocación stent [2]

Debido a que, como se ha visto en muchos de sus usos, es crítico conocer con exactitud las propiedades mecánicas de los materiales que se van a utilizar, se ha decidido realizar una simulación mediante el uso del software *Abaqus* de elementos finitos de una máquina de ensayo multiaxial. Dicha simulación permite mejorar la precisión del dispositivo de ensayo pudiendo comparar los valores teóricos con los obtenidos de manera experimental.

1.2 Objetivos

El objetivo de este proyecto es evaluar las propiedades mecánicas de los materiales hiperelásticos, en concreto de un material tipo látex mediante un dispositivo de ensayo multiaxial. Para conseguirlo se parte de un trabajo de fin de grado anterior, en el que se llevó a cabo la construcción del dispositivo de ensayo, y se realiza una evaluación mediante un software de elementos finitos tanto del material de ensayo como de la estructura de la máquina.

Es necesario hacer hincapié en la gran dificultad existente a la hora de realizar ensayos para la caracterización de las propiedades mecánicas de este tipo de materiales debido a las elevadas deformaciones a las que pueden ser sometidos. El objetivo es mejorar el diseño y analizar el funcionamiento de la máquina de ensayo que, dada su gran flexibilidad, es capaz de llevar a cabo ensayos bajo distintos estados de carga.

Después de analizar el diseño de la máquina existente en el departamento se detecta una deficiencia en el sistema de sujeción de la muestra. Actualmente, se utilizan alfileres para asegurar el material siendo muy laborioso cambiar la muestra tal y como se observa en la figura 3. Por tanto, se estudiarán distintas alternativas para facilitar y mejorar la sujeción de la muestra.

Por otro lado, se pensó que sería interesante poder utilizar la máquina para realizar ensayos uniaxiales y biaxiales. Para ello, se debe diseñar algún tipo de mordaza que lo permita.

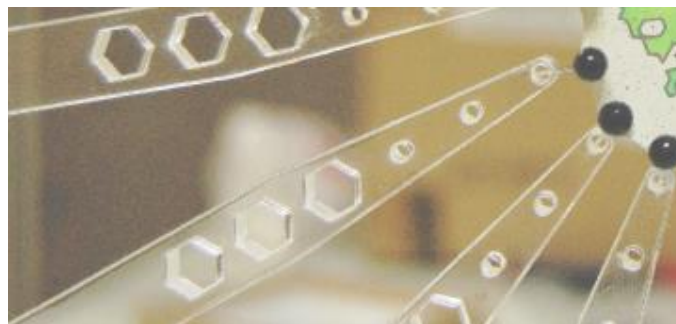


Figura 3. Detalle del sistema de sujeción

Por tanto, los objetivos son:

- Evaluar las propiedades de un material tipo látex.
- Utilizar el método de elementos finitos para simular el comportamiento mecánico del material elastómero bajo distintos estados de carga uniaxial biaxial y equiaxial.
- Diseñar y construir un nuevo sistema de anclaje para las muestras que permita su fácil colocación y realizar ensayos uniaxiales.

1.3 Fases del desarrollo

Primeramente, se ha llevado a cabo una fase de documentación y búsqueda de información con respecto al tema propuesto para el trabajo, desde el ámbito más general sobre las aplicaciones y usos más comunes de los materiales hiperelásticos, hasta un nivel más técnico incluyendo artículos y publicaciones relacionadas.

Posteriormente, se ha procedido a la búsqueda de información sobre el dispositivo de ensayo, objeto del análisis en este trabajo. Para ello se ha recurrido a trabajos de fin de grado anteriores, a publicaciones de otras universidades con dispositivos similares, así como al estudio detallado de la máquina que se encuentra en el departamento de teoría de estructuras y medios continuos, poniendo especial énfasis en analizar los puntos mejorables y determinar cómo modelizar el ensayo. Es en esta última fase donde se decide que es necesario mejorar el sistema de sujeción de la muestra.

Para realizar los cálculos numéricos ha sido necesario analizar el problema y decidir la manera óptima para realizar el modelo. Se decide utilizar un material tipo látex del que se han buscado sus propiedades en la bibliografía.

Una vez definido el problema se procede a realizar una serie de simplificaciones geométricas del mismo para mejorar la optimización del coste computacional. Para ello, se decide aplicar el principio de simetría a la muestra, realizando el estudio con distintas fracciones de esta.

Una vez validadas la hipótesis de simplificación se trasladan los valores de fuerzas que se generan durante el ensayo al cuerpo del dispositivo de ensayo, para realizar su simulación y validar el diseño.

Una vez finalizada la fase de simulación se presentan los resultados obtenidos.

Posteriormente, se diseña un nuevo tipo de mordaza para la sujeción de la muestra considerando varias opciones hasta seleccionar una y construir un prototipo mediante impresión 3D.

En la siguiente tabla se muestra el diagrama de Gant con la planificación de las tareas llevadas a cabo en el desarrollo de este trabajo.

	Mes 1				Mes 2				Mes 3				Mes 4				Mes 5				Mes 6			
MÓDULOS	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Módulo I: Documentación																								
Módulo II: Instalación del software																								
Módulo III: Diseño cuerpo de la máquina																								
Módulo IV: Diseño enganches																								
Módulo V: Simulación de la muestra																								
Módulo VI: Simulación de la máquina																								
Módulo VII: Diseño mordaza																								
Módulo VIII: Impresión de prototipo																								
Módulo IX: Elaboración de la memoria																								

Tabla 1. Diagrama de Gant

1.4 Marco regulador

El marco regulador en este trabajo, debido a su singularidad del dispositivo de ensayo, no es especialmente relevante, sin embargo, existen normativas como UNE-EN ISO 7500-1:2016 que regulan ensayos de tracción de tipo uniaxial.

Además, pueden encontrarse normativas específicas dependiendo del uso como la UNE EN 374-1:2004 que describe las características de los guantes de látex de uso sanitario y la UNE 26255:1979 que describe la metodología de ensayo para neumáticos.

2. ESTADO DEL ARTE

En este apartado se introducen las bases y los conceptos teóricos y generales que se deben tener en cuenta para el correcto desarrollo del proyecto. Para ello, el capítulo se estructura en los siguientes apartados: polímeros y clasificación, hiperelasticidad, máquina de ensayo multiaxial y método de elementos finitos.

2.1 Polímeros y clasificación

Los polímeros se definen como macromoléculas formadas por la unión de moléculas más pequeñas denominadas monómeros, que se unen entre sí mediante enlaces covalentes alcanzando grandes pesos moleculares que en algunos casos pueden llegar a alcanzar millones de UMA.

Debido a sus excelentes propiedades en muchos campos de aplicación y la posibilidad de producir polímeros sintéticos su uso está muy extendido.

Se pueden clasificar en función de varios criterios:

- Según su origen:
 - I. Natural** o biopolímeros: como algodón, madera y celulosa que se encuentran en multitud de plantas o el ADN, la piel, el pelo y las proteínas que encontramos en los animales.
 - II. Sintéticos:** que son desarrollados por el hombre, entre los que se incluyen los más extendidos en el ámbito de la ingeniería como el polipropileno (PP) polietileno (PE) y la goma de nitrilo.

Ejemplos de Polímeros Naturales



El ADN



El Almidón

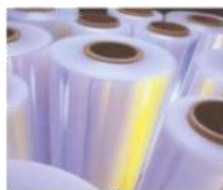


La Celulosa

Ejemplos de Polímeros Sintéticos



El Poliestireno



El Polietileno



El Nailon

Figura 4. Ejemplos de polímeros [4]

- Según su comportamiento:

I. Termoplástico: en este tipo de polímero sus propiedades mecánicas cambian al variar la temperatura comportándose de manera flexible y deformable a altas temperaturas y frágil por debajo de la temperatura de transición vítrea (la temperatura de transición vítrea varía en función del polímero, así como su temperatura de fusión). [5]

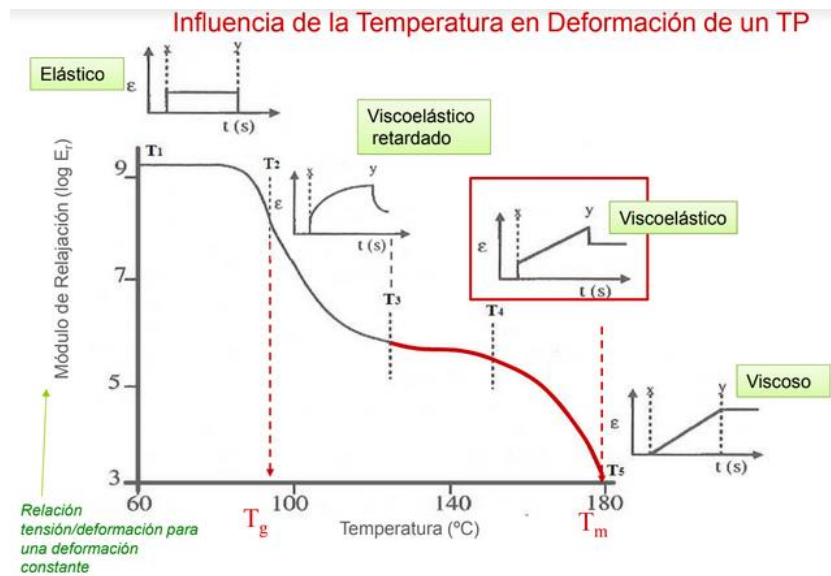


Figura 5. Influencia de la temperatura en el comportamiento [5]

Debido a sus propiedades para su conformado se pueden utilizar técnicas como la inyección, extrusión o el soplado, en las que se eleva la temperatura del polímero para aprovechar el cambio de propiedades mecánicas. [5]



Figura 6. Tipos de modelado [5]

- II. Termoestables:** Este tipo de polímero se caracteriza por ser insoluble e infusible. A menudo, se presentan en forma de dos resinas líquidas, una contiene los agentes de curado, endurecedores y plastificantes, y los otros materiales de relleno y/o reforzantes. [6]

Debido a su elevada rigidez y estabilidad térmica y dimensional, este tipo de polímeros se utiliza en la industria como adhesivo y como matriz en la fabricación de materiales compuestos. Un ejemplo sería la fibra de carbono con matriz de resina epoxi.



Figura 7. Ejemplo fibra de carbono [7]

La reacción de polimerización es irreversible y, por tanto, no pueden ser reciclados.

- III. Elastómeros:** son un tipo de polímeros comúnmente denominados cauchos. La principal característica de este tipo de polímeros es su gran elasticidad pudiendo llegar a deformaciones no permanentes superiores al 800%.

Las moléculas que componen los elastómeros se encuentran desordenadas y, al someterlas a una tensión, se produce el estiramiento y alineamiento de las cadenas en la dirección de la tensión aplicada. Una vez cesa la tensión se vuelve a producir el enmarañamiento de las moléculas volviendo el material a su estado inicial. [8]

Este tipo de polímeros tienen una gran presencia en nuestra vida cotidiana y los podemos encontrar en todo tipo de objetos como suelas de calzado,

neumáticos, juntas o aislantes eléctricos. Entre sus propiedades destacan una gran resistencia a la abrasión y capacidad de aislamiento eléctrico.

Entre los elastómeros de origen natural destaca el látex, además de por su uso predominante, por ser el primero en descubrirse. Sin embargo, el caucho natural extraído de los árboles carece de las propiedades mecánicas que hacen interesante su uso.



Figura 8. Ejemplos de uso [9]

Se extrae principalmente del árbol *Hevea Brasiliensis* haciendo unos cortes en su tronco y recogiendo el fluido en un recipiente, tal y como se muestra en la figura 9. El látex obtenido se calienta y se mezcla con un ácido, normalmente ácido acético, permitiendo la extracción del caucho en bruto. Este caucho en bruto no es utilizable, tiene un aspecto viscoso y no tiene capacidades elásticas. A bajas temperaturas es quebradizo mientras que a altas temperaturas se presenta como una sustancia blanda. [9]



Figura 9. Obtención del látex [10]

Debido a las malas propiedades mecánicas del caucho natural su uso estuvo muy limitado hasta el descubrimiento por parte de Charles Goodyear en 1839 del proceso denominado vulcanización. Este proceso consiste en añadir azufre al caucho en bruto a alta temperatura. El material obtenido posee unas excelentes propiedades mecánicas y elásticas siendo lo que comúnmente se conoce como caucho.

El proceso de vulcanización se puede llevar a cabo además de con azufre, con peróxido orgánico. Se trata de un proceso irreversible en el que se produce un entrecruzamiento que mejora las propiedades mecánicas.

2.2 Hiperelasticidad

Se denomina material hiperelástico a aquel que tiene la capacidad para experimentar grandes deformaciones y recuperar su estado inicial al eliminar las tensiones sin presentar deformaciones permanentes.

La teoría de la elasticidad lineal no se considera válida para este tipo de materiales por lo que se han desarrollado multitud de modelos para describir el comportamiento de los materiales hiperelásticos. [3]

Las principales características de un material hiperelástico son:

- El esfuerzo y la deformación no son proporcionales y es la causa por la que la teoría lineal de la elasticidad no es válida. Se asume la existencia de un potencial de energía elástica a partir del cual se pueden obtener las tensiones.
- Presenta grandes deformaciones.
- Recupera su estado inicial después del cese del estado tensional.

El comportamiento de este tipo de materiales, tal y como se puede observar en la figura 10, se divide en tres fases. En primer lugar, una pequeña fase de deformación lineal. En segundo lugar, una zona en la que con un pequeño incremento de los esfuerzos se generan grandes deformaciones y, por último, una zona en la que la tensión aumenta muy rápidamente. [11]

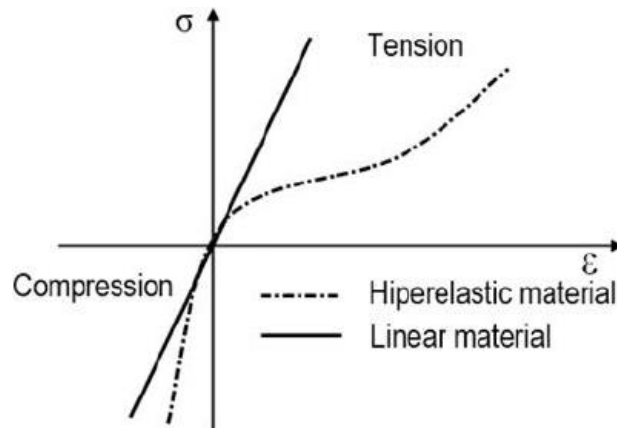


Figura 10. Comportamiento material hiperelástico [3]

Existen dos criterios principales a la hora de elaborar un modelo que describa el comportamiento de los materiales hiperelásticos.

Modelos basados en los invariantes de deformación: En estos modelos la energía de deformación se expresa en función de los invariantes del tensor de deformación $U = f(I_1, I_2, I_3)$. El modelo más representativo es el polinomial desarrollado por Rivlin, que fue el primer modelo utilizado para analizar el comportamiento de los elastómeros sirviendo como base para la elaboración de modelos posteriores. [17]

Modelos basados en las relaciones de estiramiento: En estos modelos la densidad de energía de deformación se encuentra en función de las relaciones de estiramiento, el modelo más representativo es el modelo de Ogden que se aplica a materiales incompresibles. [17]

2.3 Máquina de ensayo multiaxial

El dispositivo de ensayo multiaxial ha sido desarrollado por el equipo de la Universidad Johannes Kepler en Linz (Austria) liderado por el doctor Stefan E. Schausberger. El desarrollo de este dispositivo surge de la necesidad de disponer de una máquina de ensayos con estados de carga multiaxiales para materiales tipo látex. Se trata de una máquina extremadamente compacta comparándola con las máquinas disponibles en el mercado (figura 11). Se basa en un proyecto de código abierto y, por tanto, cualquier persona puede descargarse los planos de construcción de la máquina. Además, los materiales que la componen son sencillos de conseguir y el montaje de la máquina es relativamente fácil.

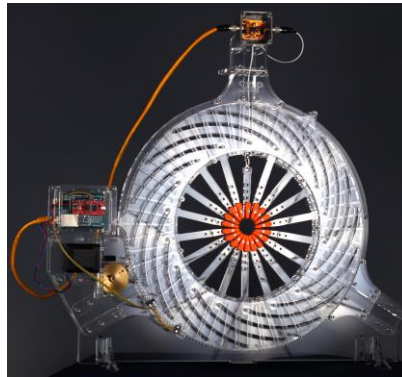


Figura 11. Máquina de ensayo [12]

La caracterización del material se lleva a cabo mediante sensores de desplazamiento que miden la deformación que se ha producido en los elementos de anclaje de la muestra. Estas mediciones se llevan a cabo durante el ensayo de tracción equiaxial para evaluar las propiedades del material ensayado.



Figura 12. Máquina de ensayo de gran tamaño [12]

El principio de funcionamiento de la máquina se basa en la rotación de un bastidor ranurado que genera una expansión de la muestra. Para medir las tensiones se utiliza una banda extensiométrica situada en uno de los brazos que sujetan la muestra.

Tal y como se observa en la figura 11 el dispositivo de ensayo se compone de 18 brazos colocados en posición radial que se encargan de traccionar la muestra. Cada uno de estos brazos está situado en una pista dentro del bastidor de manera que al girar este se produce una expansión sincronizada que aumenta el diámetro de la muestra. Los brazos se conectan al bastidor mediante tornillería de M3 y rodamientos de bolas lubricados con aceite de silicona para minimizar el rozamiento y aumentar la precisión de los resultados obtenidos. Para medir la deformación se emplea una banda extensiométrica situada sobre

uno de los brazos y, debido a la simetría radial del dispositivo la banda, se puede colocar indistintamente sobre cualquiera de los brazos. Tal y como se muestra en la figura 13 el funcionamiento de las bandas extensiométricas es relativamente sencillo, la resistencia eléctrica de la banda aumenta al incrementar su longitud. Para la aplicación que se necesita en este dispositivo es necesario utilizar una banda uniaxial, pero es importante destacar que existen bandas que permiten medir la deformación en diferentes direcciones.

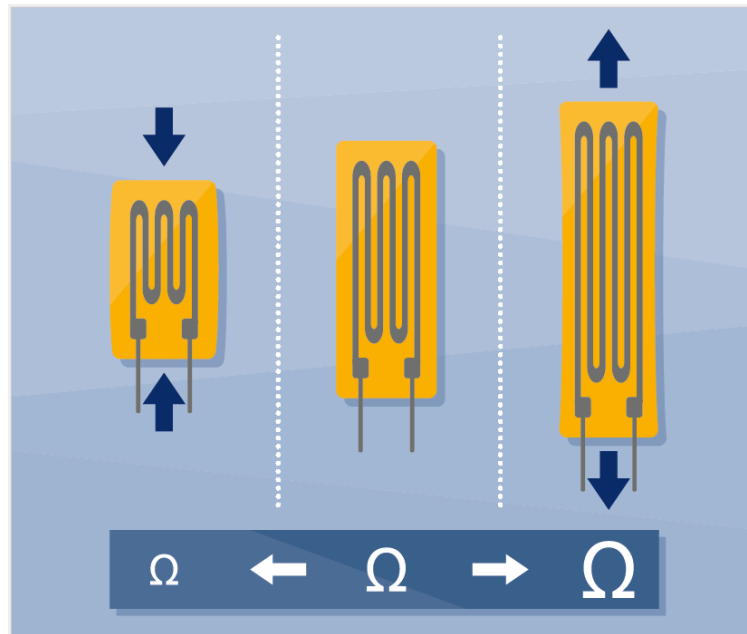


Figura 13. Bandas extensiométricas [13]

Una de las modificaciones que se ha pensado realizar a la máquina es la incorporación de un sistema de anclaje y sujeción de la muestra que permita una colocación más precisa y sencilla de la misma, puesto que en la actualidad se realiza mediante el uso de alfileres. Este sistema tiene como ventaja que produce poca distorsión en los resultados del ensayo, pero, a cambio, es extremadamente complejo anclar correctamente la muestra. Se estudiará el diseño de una pinza magnética fabricada mediante impresión 3D. También sería muy interesante que el nuevo sistema de anclaje permitiese la realización de ensayos uniaxiales así como biaxiales.

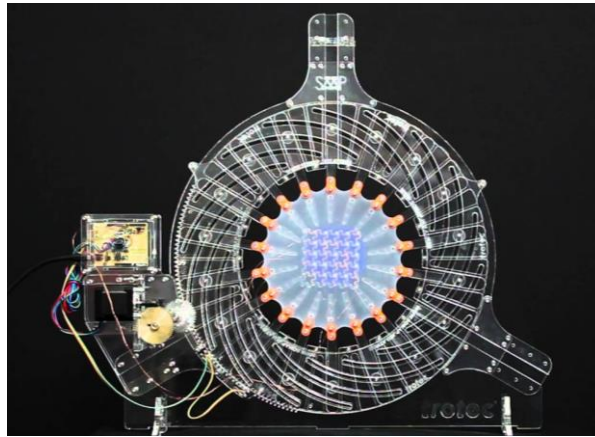


Figura 14. Máquina de ensayo [12]

2.4 Método de elementos finitos

En la actualidad el uso del método de los elementos finitos (MEF) está ampliamente extendido en el sector industrial y se siguen desarrollando numerosas investigaciones al respecto. Su desarrollo ha ido ligado a la evolución de la informática y al aumento de la capacidad de cálculo de los procesadores, puesto que carece de sentido operar manualmente el método de los elementos finitos. Su uso se ha extendido con rapidez debido a que consigue un gran ahorro de costes permitiendo reducir en gran medida los gastos en prototipos. A pesar de que se pueden obtener resultados exactos en determinadas geometrías y estados de carga muy sencillos, en la práctica, se utiliza la resolución empleando métodos numéricos que analizan y diseñan con un alto grado de precisión. Por tanto, el método de elementos finitos permite un gran ahorro en el número de prototipos construidos. Sin embargo, estos siguen siendo necesarios en las fases finales del proceso de diseño puesto que los resultados obtenidos en el método de elementos finitos no son exactos sino aproximaciones del resultado final. [11]

El método de elementos finitos es uno de los métodos numéricos que más se han desarrollado e implementado en la industria y en muchos problemas de índole científica con éxito. Aun así, es de gran importancia recordar que las soluciones que arroja a los problemas de mecánica del medio continuo son aproximaciones, que serán más o menos exactas en función de los parámetros introducidos, por lo que hay que utilizarlo de manera correcta. Este método permite realizar estudios preliminares antes de la realización experimental. [11]

De esta manera se permite, a posteriori, que se puedan comparar los resultados experimentales con los obtenidos mediante cálculo numérico permitiendo así mejorar o validar el modelo y utilizarlo para obtener otros datos de interés que no se hayan conseguido de manera experimental.

En este método se divide el elemento a estudiar en un conjunto finito de elementos interconectados entre sí por puntos denominados nodos. Generalmente son elementos de geometría sencilla, triángulos o elementos cuadrangulares. Las mismas ecuaciones que rigen el comportamiento del medio continuo rigen también las del elemento. De esta manera se consigue simplificar el problema pasando de un sistema continuo con infinitos grados de libertad y regido por sistemas de ecuaciones diferenciales a un sistema con un número limitado de grados de libertad y un comportamiento que se puede describir con un sistema de ecuaciones lineales. El campo de desplazamientos en el interior de cada elemento se obtiene por interpolación de los desplazamientos de los nodos que lo componen. Por tanto, las incógnitas del problema serán siempre los desplazamientos en los nodos, a partir de los cuales se pueden determinar las tensiones conociendo las propiedades mecánicas del material que compone el continuo. [11]

El conjunto de nodos en los que se divide el medio continuo se denomina malla. El primer paso antes de comenzar un cálculo de elementos finitos debe ser definir la malla. La precisión de los resultados obtenidos depende del tamaño de los elementos que componen la malla, al disminuir el tamaño se aumenta generalmente la precisión. Sin embargo, esto trae consigo un aumento del coste computacional. Es de gran importancia encontrar el equilibrio entre precisión y coste computacional disminuyendo el tamaño de los elementos en los que, por geometría o por las condiciones de contorno, sea necesario. Una vez generada la malla se imponen las diferentes condiciones de contorno.

El proceso al utilizar el método de los elementos finitos se puede dividir en tres etapas:

- Preproceso: en esta etapa se definen la geometría, las condiciones de contorno, las propiedades de los materiales y se genera la malla.
- Proceso: Se resuelve el problema planteado en el preproceso y se generan las soluciones.
- Postproceso: en esta etapa se muestran gráficamente los resultados obtenidos durante el proceso.

Para el desarrollo de este proyecto se ha decidido utilizar el software comercial de elementos finitos *Abaqus* en su versión 6.14. Se ha tomado la decisión de utilizar este software debido a que durante la realización del grado en ingeniería mecánica se han llevado a cabo numerosas prácticas que permiten aprender el manejo del programa y, además, tiene implementados varios modelos matemáticos para el estudio de los materiales hiperelásticos. En esta ocasión por la geometría del problema, así como por el estado de cargas complejo, ha sido necesario utilizar una de las 40 licencias profesionales de las que dispone el departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras, puesto que la versión gratuita disponible para estudiante cuenta con una limitación en la malla de 1000 nodos.

3. PROCEDIMIENTO

En este capítulo se describe el procedimiento seguido para la realización de los modelos y su simulación utilizando software CAD y de análisis de elementos finitos. Se seguirá un orden cronológico, comenzando por la elaboración del diseño 3D, planteamiento del problema, análisis de elementos finitos incluyendo todas sus simplificaciones y, para finalizar, el diseño del nuevo sistema de sujeción.

3.1 Diseño del modelo 3D

Se ha partido de un plano bidimensional de las piezas que componen el equipo que ha servido para obtener la geometría de la máquina de manera precisa, puesto que con estos planos se procedió al corte por láser de las piezas de la estructura.

A continuación, se intentó importar los planos a Catia para realizar los modelos tridimensionales, pero debido a errores de compatibilidad, se descartó la opción y se partió desde cero a diseñar las piezas obteniendo las dimensiones de los planos originales.

Mediante protrusión se obtienen las dos piezas en las que se va a centrar el análisis estructural, los soportes que sujetan la muestra (figura 15) y el cuerpo del dispositivo al que se unen los soportes y que incluye las pistas por las que se mueven los soportes.

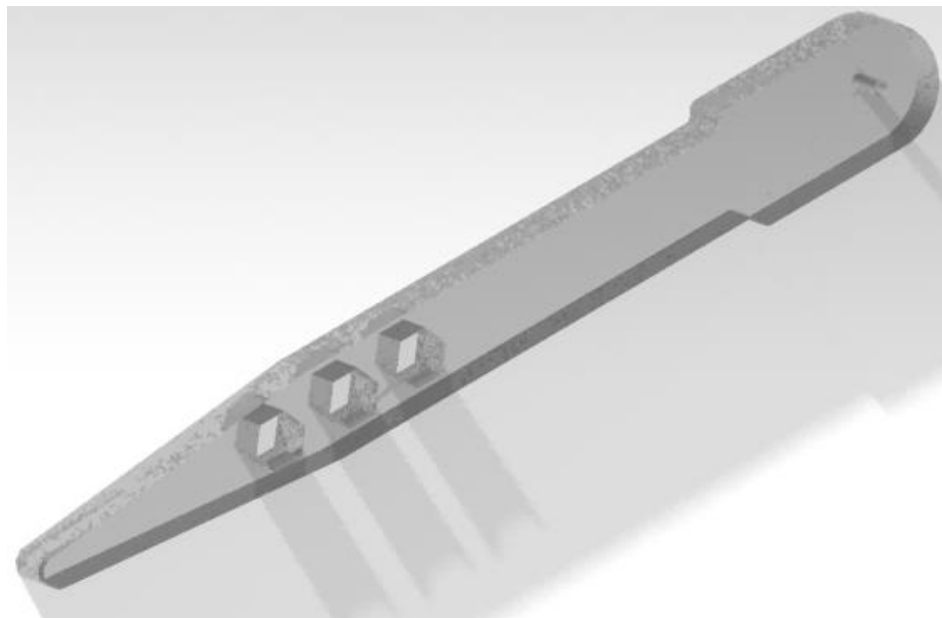


Figura 15. Soportes

3.2 Planteamiento del problema

En primer lugar, se observa el funcionamiento del dispositivo para poder elaborar un modelo numérico que lo refleje de manera fiel un proceso de ensayo.

Después de analizar el movimiento de la máquina, tanto experimentalmente como mediante los videos disponibles de máquinas que se encuentran en otras universidades, se observa que el giro de la máquina induce a una expansión equiaxial de los soportes y, por tanto, de la muestra que se encuentra anclada por 18 soportes que se desplazan radialmente en un movimiento de expansión.

Como simplificación se decide no considerar el giro de la máquina y simular directamente la expansión radial de los soportes.

En primer lugar, es necesario realizar la simulación sobre la muestra, induciéndole una deformación equiaxial y utilizar los resultados de fuerzas obtenidas para introducirlos tanto en el soporte como en la estructura del dispositivo. Puesto que en el dispositivo de ensayo los esfuerzos que se generan en el material ensayado se transmiten a las estructuras de soporte y el cuerpo del dispositivo. Los parámetros de simulación se han seleccionado intentando aprovechar la capacidad máxima de expansión de la máquina de ensayo.

Parámetros de la simulación		
Diámetro inicial (mm)	Espesor (mm)	Diámetro final (mm)
100	2	200

Tabla 2. Parámetros de la simulación

3.3 Análisis de elementos finitos

3.3.1 Definición y simplificación del problema

Una vez finalizado el modelo tridimensional, se procede a importarlo a un código de elementos finitos comercial, en este trabajo, *Abaqus* versión 6.14. Después de analizar las ventajas e inconvenientes del resto de alternativas comerciales se ha concluido que tiene la capacidad de realizar los cálculos que se precisan y, además, tiene implementados modelos para el análisis de materiales hiperelásticos.

En primer lugar, se importan los modelos creados en Catia para su posterior análisis.

Se decide comenzar por el análisis de la muestra de material hiperelástico, en un principio se pensó realizar la simulación con un elemento 3D para ir simplificándolo después en posteriores modelos. La muestra objeto de estudio se define como una pieza de sección circular de diámetro 0.1 m y espesor 2 mm.

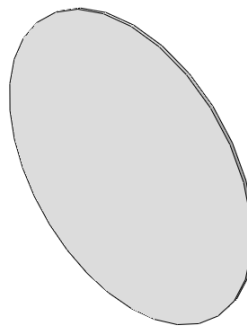


Figura 16. Modelo de la muestra

En cuanto al estado tensional en esta primera simplificación del problema se aplican las cargas en forma de un desplazamiento. Para aplicar dicho desplazamiento es necesario crear un sistema de referencia en coordenadas polares. Dicho desplazamiento se decide aplicar en la cara exterior del cilindro tal y como se muestra en la figura 17.

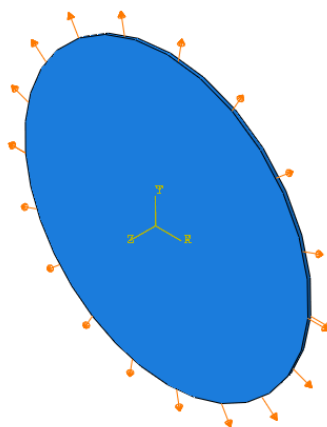


Figura 17. Esquema de la aplicación de las cargas

Al tratarse de una primera aproximación al problema, no se ha trabajado en un análisis del mallado. Se ha aplicado un mallado tetraédrico a toda la pieza con el fin de obtener

resultados con los que validar las simplificaciones del problema que se harán posteriormente.

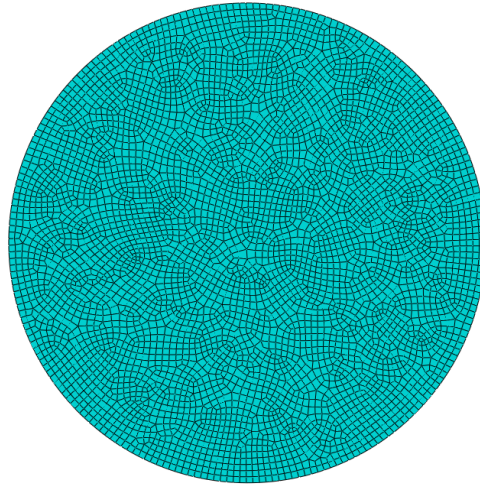


Figura 18. Mallado preliminar

Debido a que el cambio de espesor no es muy significativo al contar con un espesor inicial reducido vamos a considerar un estado de tensión plana en el que no encontramos deformaciones transversales. Se decide simplificar la simulación considerando la pieza un sólido 2D tipo planar, de manera que conseguimos un considerable ahorro desde el punto de vista computacional, como se refleja en la tabla de comparación de resultados que se muestra más adelante.

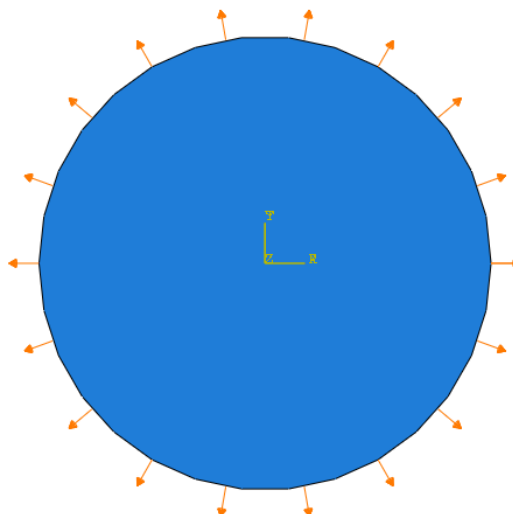


Figura 19. Carga radial

En este caso la fuerza se aplica como un desplazamiento radial en la circunferencia exterior como se observa en la figura 19.

Observando la geometría y el funcionamiento de la máquina de ensayo se llega a la conclusión que la fuerza no se ejerce de manera uniforme a lo largo de todo el perímetro, sino que se induce un desplazamiento en cada uno de los 18 puntos de anclaje de los soportes con la muestra. Por lo tanto, se decide incluir esto en el análisis de elementos finitos, puesto que puede influir en la distribución de tensiones de las zonas colindantes con los puntos de aplicación. Sin embargo, tal y como se demostrará más adelante mediante la obtención de perfiles de tensión a lo largo de la dirección radial, si nos alejamos lo suficiente del lugar de aplicación de la fuerza el estado tensional no depende de la forma de aplicación de la fuerza como describe el principio de Saint Venant.

En el diseño original de la máquina de ensayo, la fuerza se aplicaba mediante alfileres que sujetaban la muestra, pero se decidió mejorar este sistema de sujeción de manera que fuera más sencillo para el operario colocar las muestras. La solución elegida emplea imanes de un diámetro de 8 mm para el agarre de la muestra, por lo tanto, se ha decidido realizar un modelo con dicho sistema.

Para aplicar las fuerzas en *Abaqus* se ha optado por crear 18 puntos sobre los que se aplica el desplazamiento, estos puntos se unen a los perímetros con el diámetro de los imanes seleccionados ligando sus desplazamientos como se muestra en la figura 20.

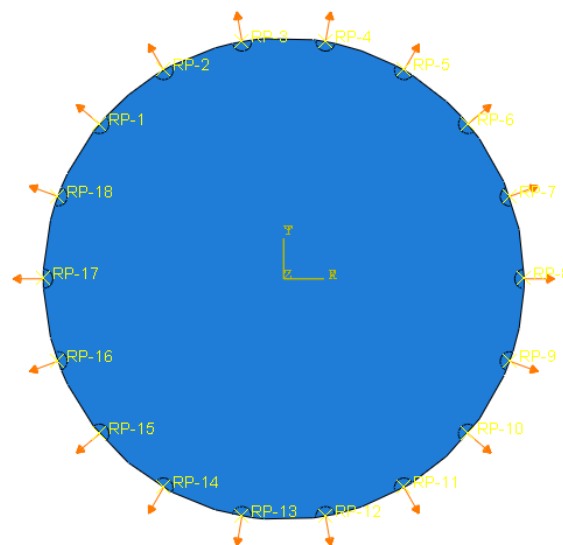


Figura 20. Cargas reference point

Continuando con la simplificación del problema a fin de optimizar el coste computacional se decide aplicar una simplificación por simetría al problema, en un primer lugar se aplica

simetría dividiendo la muestra en dos. Para ello se modeliza un semicírculo y en la región del eje de simetría se decide imponer una serie de restricciones. En este caso utilizando un sistema de coordenadas polares se bloquean todos los desplazamientos excepto el radial y se aplican las fuerzas, en forma de desplazamientos, en los *reference point* tal y como se ha explicado en el ejemplo anterior. Es importante remarcar que los valores de fuerzas obtenidos en los puntos que se encuentran en el eje de simetría serán la mitad que en el resto.

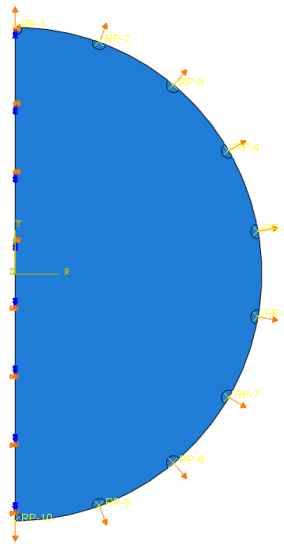


Figura 21. Cargas semicírculo

Con la finalidad de mejorar aún más la optimización del cálculo se decide optar por una simplificación de $\frac{1}{4}$ de circunferencia, aunque se decide abandonar esta idea como se verá más adelante. Para implementar estas condiciones de simetría se aplican las mismas condiciones de contorno que en el caso anterior, pero en este caso a los dos ejes de simetría existentes cabe destacar que a pesar de que estas condiciones se han aplicado en coordenadas polares podrían aplicarse en coordenadas cartesianas puesto que en ambos casos los ejes de simetría coinciden con los ejes de coordenadas cartesianas.

Esta geometría se analizó tanto con desplazamientos puntuales en los *reference point* como a lo largo de todo el perímetro. El motivo para descartar este tipo de simplificación es que a pesar de que geométricamente las condiciones de geometría, al analizar el estado de cargas se observa que no es simétrico.

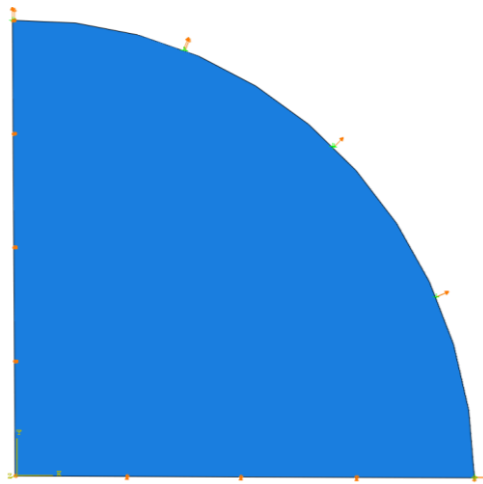


Figura 22. Cargas círculo $\frac{1}{4}$

Esto nos lleva a la simplificación final del problema: dividir la circunferencia en 18 porciones, tantas como puntos de aplicación de las cargas encontramos en el problema. Esto nos garantiza la mayor optimización en cuanto a coste computacional. No obstante, para aplicar este tipo de simetría, al contrario que en los casos anteriores, sí que es imprescindible aplicar las condiciones de contorno a los ejes de simetría en un sistema de coordenadas polares puesto que estos no tienen por qué coincidir con los ejes.

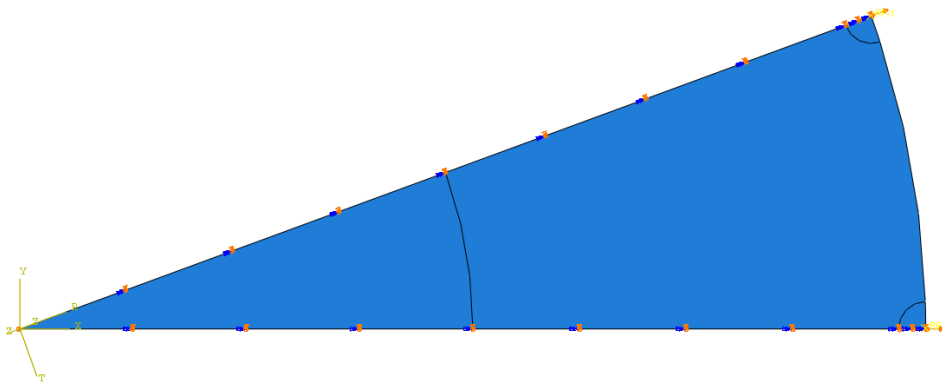


Figura 23. Cargas círculo $\frac{1}{18}$

3.3.2 Análisis del mallado

Para definir el análisis de malla el primer paso ha sido utilizar el mallado que aplica por defecto *Abaqus* a la pieza y valorar los resultados obtenidos para ver qué tipo de mejoras eran necesarias y sobre todo observar en que zonas es necesario afinar la malla para lograr una mayor precisión. En esta primera aproximación se utiliza una malla compuesta por 4986 elementos cuadrangulares.

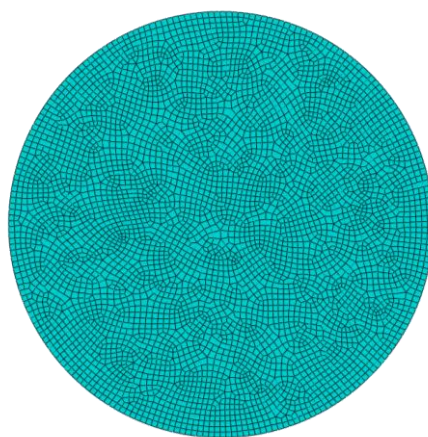


Figura 24. Mallado preliminar

A continuación, se comprueba aplicando los desplazamientos en los puntos de anclaje en lugar de en la circunferencia exterior. Puesto que en la región próxima a los imanes es previsible que se encuentren puntos de concentración de tensiones que es necesario tener en cuenta, puesto que en caso de superar la tensión de rotura del material pueden impedir la correcta realización del ensayo.

Después de realizar la primera simulación se procede a simular el círculo completo aplicando los desplazamientos en los puntos de anclaje de la muestra, puesto que es previsible que al aplicarse de manera puntual se produzcan heterogeneidades en las zonas próximas a los puntos de aplicación, los resultados de estas regiones deben ser descartados a la hora de obtener las propiedades de los materiales, sin embargo, tal y como se ha expresado anteriormente, es importante que en ninguna región se supere el límite de rotura del material ensayado puesto que de superarse se generaría una fractura que invalidaría el ensayo.

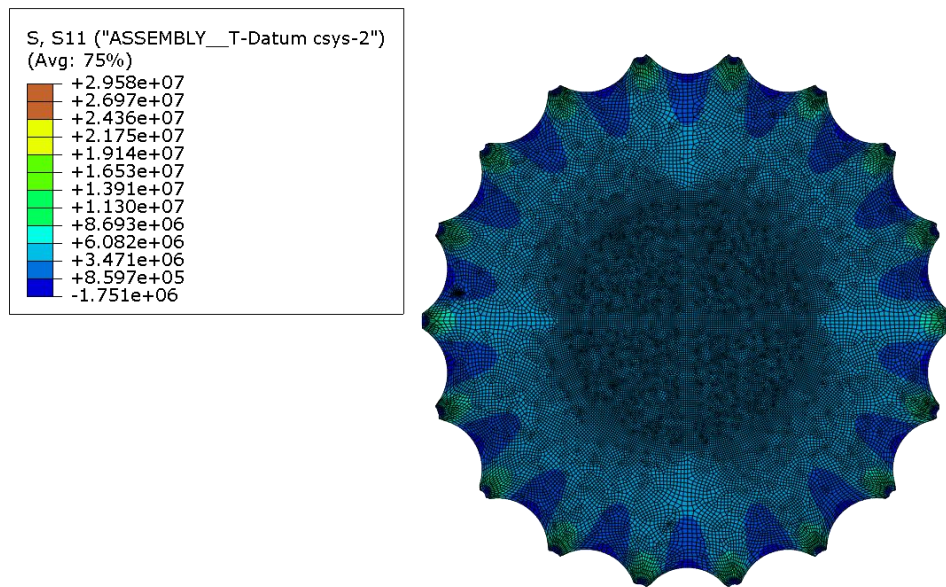


Figura 25. Distribución de tensiones en dirección radial

Como se puede observar en la región central de la muestra encontramos unos valores de tensión homogéneos que permiten realizar el estudio de las propiedades del material. En la región objeto de estudio se utilizará un mallado de menores dimensiones con el objetivo de mejorar la precisión de los datos obtenidos. Para ello se subdivide la muestra, a efectos de la simulación, en varias regiones según la densidad de malla que se precise en cada una.

Este análisis con el mallado dividido se ha realizado para la muestra completa, la simplificación con un cuarto de la muestra y para la simplificación de la muestra dividida entre dieciocho para permitir comparar los resultados obtenidos y determinar si merece la pena realizar la simplificación por simetría por su influencia en el coste computacional. Tanto en la región central como en el perímetro de los puntos de aplicación del desplazamiento se ha utilizado un mallado fino de tamaño de elemento 0.8 mm mientras que para el resto se ha optado por un mallado más grueso con un tamaño de 1.8 mm puesto en esa zona es menos crítico obtener una gran precisión y, de esta manera, mejoramos notablemente el coste computacional. Se han utilizado elementos cuadrangulares y el número de elementos resultante para cada simplificación se puede observar en la tabla 3.

Número de elementos		
Círculo completo	Simplificación 1/2	Simplificación 1/18
35669	17848	1715

Tabla 3. Número de elementos del mallado

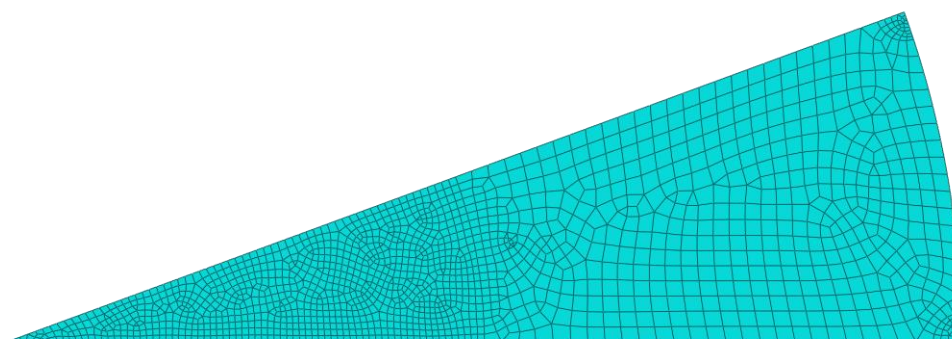


Figura 26. Detalle de zonas de mallado

Para el análisis de elementos finitos de la pieza de soporte se decide aplicar una restricción de tipo encastre en el extremo que se une al resto del cuerpo de la máquina de ensayo y una fuerza puntual en el extremo que sujeta la muestra. En esta pieza se puede sustituir el encastre por una restricción que permita el giro si se desea puesto que debido a la disposición de las cargas no se va a producir ningún giro. El valor de esta fuerza puntual se ha extraído de las simulaciones realizadas previamente con el material hiperelástico de manera que se ha sometido al material al estiramiento máximo que permite el dispositivo y se ha extraído el valor de fuerza resultante de uno de los puntos de aplicación del desplazamiento que previamente se habían generado en el archivo de la muestra.

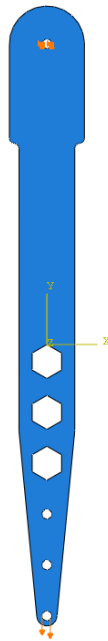


Figura 27. Condiciones de contorno soporte

El mallado de este elemento es una cuestión crítica puesto que se en él se debe situar la banda extensiométrica que permita obtener valores de fuerza para su posterior análisis.

Se ha utilizado un mallado más fino en las regiones próximas a los puntos de aplicación de las cargas y a los puntos en los que en un primer análisis se ha detectado que, debido a su geometría, existe una mayor concentración de tensiones como pueden ser las tres incisiones hexagonales.

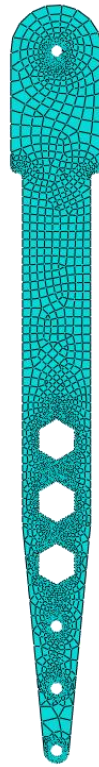


Figura 28. Mallado soporte

Al realizar las primeras simulaciones se encuentra una zona candidata para la ubicación de la banda extensiométrica debido a que encontramos una distribución de tensiones muy uniforme que permite su instalación como se puede observar en la figura 28. Desde el punto de vista geométrico se trata de una zona lisa sin perforaciones en la que es sencillo colocar el sensor.

En la simulación de esta pieza es crítico comprobar que la deformación que se produce es lo suficientemente grande como para que pueda ser medida por la banda extensiométrica

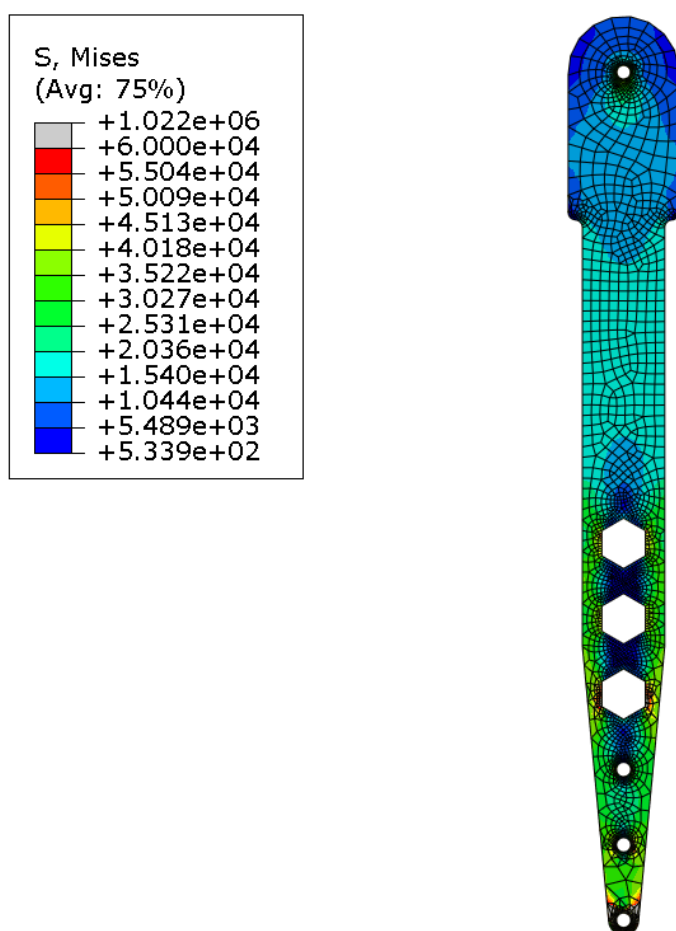


Figura 29. Ubicación de la banda extensiométrica

El cuerpo del dispositivo es, sin duda, la pieza con la geometría más compleja de este trabajo, por tanto, para poder describirla de manera precisa se ha utilizado una malla con un número de nudos relativamente elevado. El objetivo de realizar el análisis estructural de esta pieza es sobre todo garantizar que sus deformaciones se pueden considerar despreciables y no van a afectar a los resultados obtenidos de manera significativa.

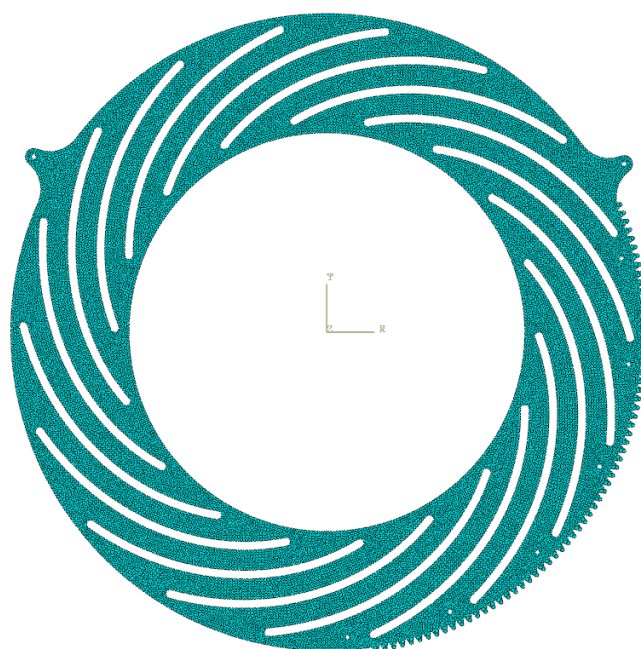


Figura 30. Mallado cuerpo de la máquina

Para el sistema de cargas en esta pieza se ha tratado de ser lo más fiel posible al problema real y, por tanto, se han introducido dos encastrados en los puntos de fijación de la estructura y 18 cargas puntuales, para las que se ha usado el mismo valor que en la pieza de soporte. Para las cargas puntuales ha sido necesario implementar un sistema de coordenadas polares con origen situado en el centro de la pieza.

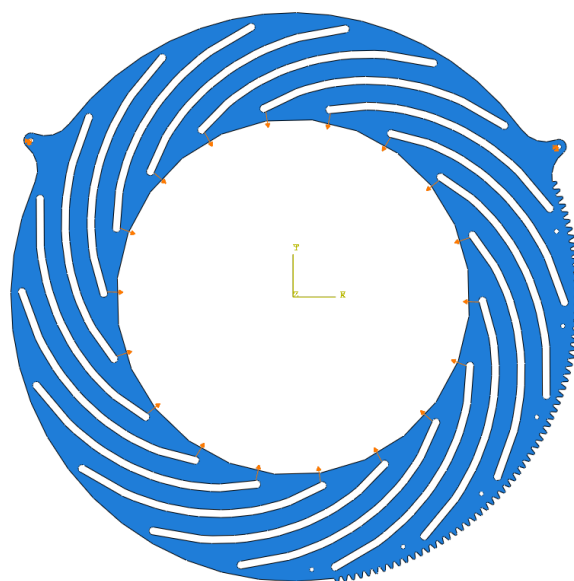


Figura 31. Condiciones de contorno del cuerpo de la máquina

3.3.3 Propiedades de los materiales

A la hora de introducir las propiedades de los materiales en los modelos se ha optado por emplear para la estructura del dispositivo metacrilato genérico. Al observar los esfuerzos a los que se encuentra sometido se concluye que puede modelizarse como elástico lineal tal y como se demostrará en los resultados obtenidos, puesto que la tensión máxima que alcanza durante el proceso de ensayo es muy inferior a su límite elástico. Las propiedades del metacrilato se describen en la siguiente tabla.

Propiedades mecánicas metacrilato			
Módulo elástico (GPa)	Coefficiente de Poisson	Resistencia mecánica a la compresión (MPa)	Resistencia mecánica a la tracción (MPa)
2.24-3.8	0.384-0.403	72.4-131	8.3-79.6

Tabla 4. Propiedades mecánica metacrilato [14]

A la hora de modelizar el material de ensayo se ha decidido utilizar, en primera instancia, un modelo de material elástico para validar que las simulaciones en *Abaqus* funcionaban y que los valores obtenidos eran correctos. Una vez superada esta fase de valoración se sustituye el material elástico por un material hiperelástico tipo caucho cuya simulación se va a realizar con un modelo tipo ogden de segundo grado, que ya se encuentra implementado en el software.

Las propiedades de este material necesarias se muestran en la siguiente tabla:

Material	Ogden-Parameter			
	μ_1 (MPa)	x_1	μ_2 (MPa)	x_2
NR-Filled	1.255237	3.032694	0.503911	0.0000362
EPDM-Filled	0.615959	2.7190015	0.000019	7.922556
NR-Unfilled	0.5241	2.4022	$2.1567 \cdot 10^{-07}$	11.0328
EPDM-Unfilled	0.5432	2.1010	0.00	6.5465

Tabla 5. Propiedades del látex [15]

Una vez introducidas en el programa las propiedades del material se decide realizar una evaluación en caso uniaxial y biaxial de la tensión frente a la deformación. De manera que obtendremos las curvas características de este material.

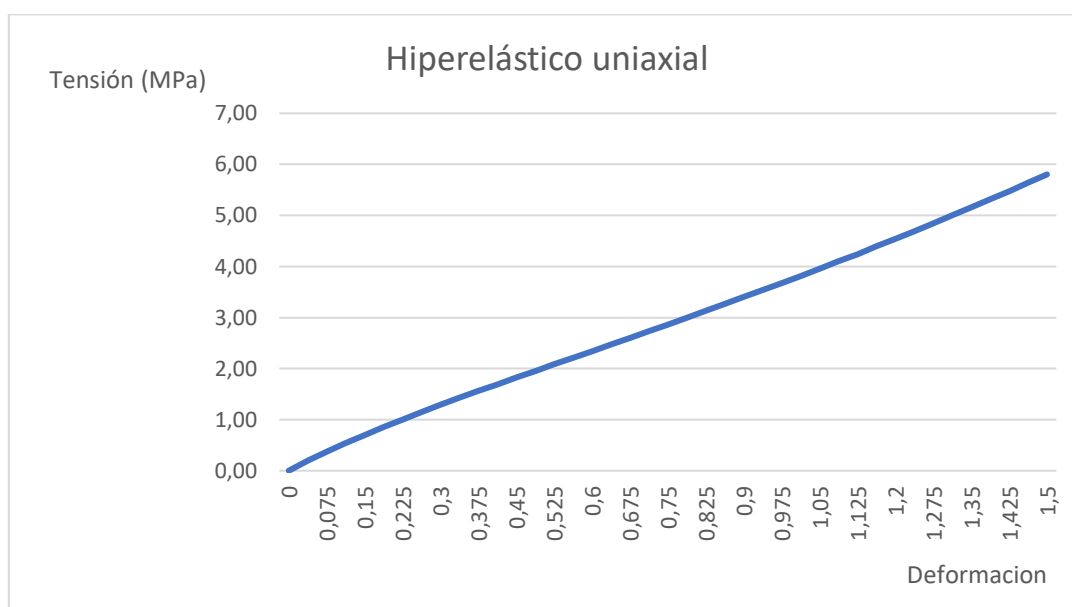


Figura 32. Hiperelástico uniaxial

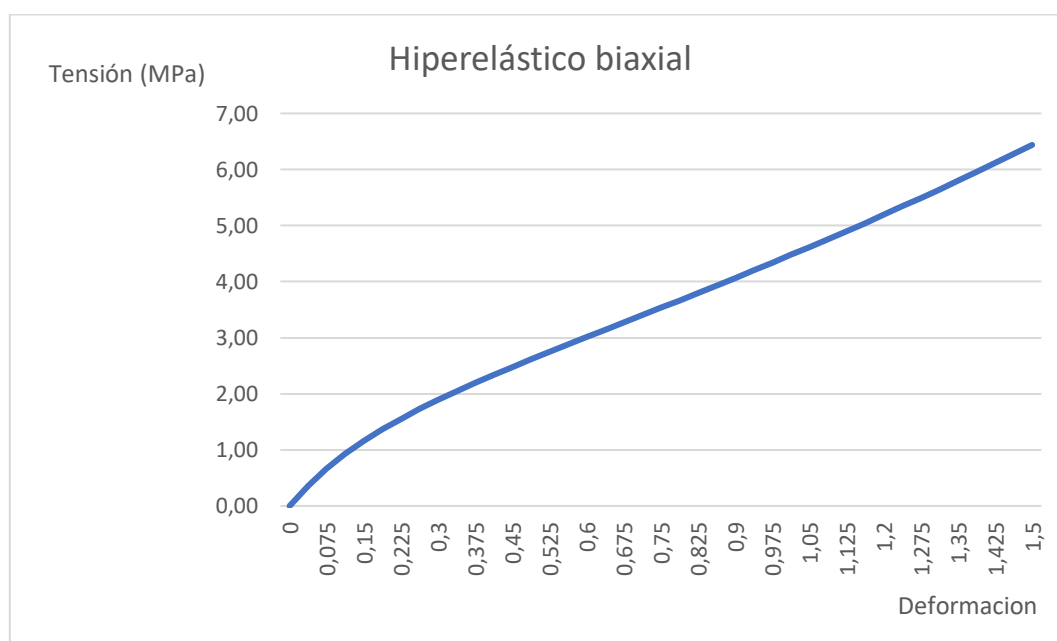


Figura 33. Hiperelástico biaxial

En estas curvas se puede observar que, tal y como es característico de los materiales hiperelásticos, no encontramos un comportamiento lineal a lo largo de toda la zona elástica, esta tendencia se observa de manera más pronunciada en el caso del ensayo biaxial.

3.4 Diseño del sistema de sujeción

Como se ha descrito anteriormente el sistema de agarre de la muestra es muy laborioso y por tanto se ha decidido diseñar un nuevo sistema que permita la colocación sencilla de las muestras.

En un primer lugar se consideraron varias opciones entre las que se seleccionaron 2 para analizar en más detalle. Ambas opciones tienen un diseño similar, empleando una pinza con una bisagra y dos salientes que coinciden con los orificios de la pieza de soporte, sin embargo, su mecanismo de agarre es muy distinto.



Figura 34. Mordaza

- La primera opción es utilizar un corchete para garantizar la sujeción de la muestra.
- La segunda opción es utilizar dos imanes de elevada potencia uno en cada cara de la pinza de manera que ejerzan suficiente fuerza como para sujetar la muestra durante el ensayo.

Finalmente se ha decidido utilizar la opción de los imanes puesto que nos permite realizar el estudio sin tener que realizar orificios a la muestra y por su gran facilidad de uso. En un principio se plantea la utilización de imanes de neodimio de un diámetro de 6 mm, sin embargo, este diámetro tan pequeño generaba unas grandes concentraciones de tensiones en la muestra pudiendo alcanzar la tensión de rotura durante el ensayo y consultando con el fabricante la fuerza que generan se determinó que era insuficiente por lo que se aumentó el diámetro a 8 mm.

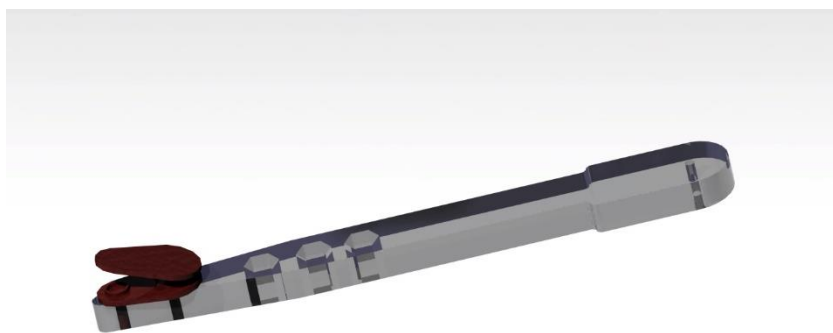


Figura 35. Conjunto de agarre

Con la finalidad de validar el diseño se ha decidido fabricar un prototipo de esta pieza mediante impresión 3D. El prototipo se ha fabricado en PLA debido a su menor complejidad técnica a la hora de realizar la impresión y a que este material tiene una rigidez relativamente elevada, 2346.5 MPa. El uso este tipo de material permite prescindir de la utilización de una cama caliente durante la impresión además se trata de un material biodegradable elaborado a partir de restos vegetales. [16]

Para elaborar el archivo *gcode* necesario para realizar la impresión se ha utilizado el software Simplify 3D en su versión comercial, en este software se ha introducido la temperatura óptima para la impresión recomendada por el fabricante del PLA. A la hora de seleccionar los parámetros de impresión se ha tratado de conseguir una gran precisión utilizando una velocidad de impresión relativamente baja.

Parámetro de impresión	
Altura de capa (mm)	0.16
Nº perímetro laterales	3
Nº de capas superiores	3
Nº de capas inferiores	3
Temperatura de impresión (°C)	210
Temperatura cama caliente (°C)	Tª ambiente
Material	PLA
Velocidad de impresión (mm/s)	60

Tabla 6. Parámetros de impresión

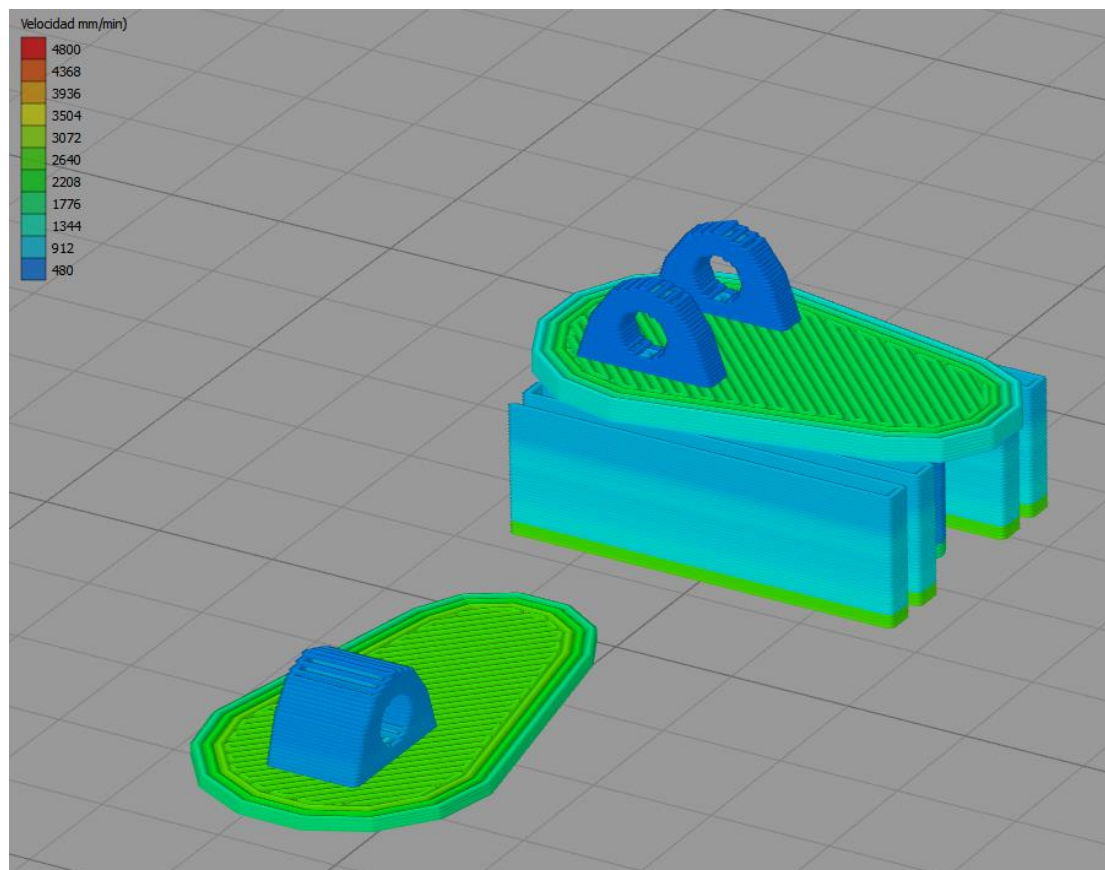


Figura 36. Velocidades de impresión

Debido a la geometría compleja de la pieza se concluye que es necesaria la utilización de elementos de soporte para su correcta impresión, estos elementos resultan sencillos de retirar.

Este tipo de agarre es increíblemente versátil puesto que no solo permite la realización de ensayos multiaxiales, sino que mediante el uso de solo dos de los 18 soportes que se encuentren diametralmente opuestos se pueden realizar simulaciones uniaxiales y eligiendo 4 soportes enfrentados 2 a 2 es posible realizar ensayos biaxiales de manera sencilla.

4. RESULTADOS

En este apartado se expondrán los resultados obtenidos en las simulaciones. En primer lugar se realizan las debidas comparaciones entre las distintas hipótesis de simplificación, posteriormente analizando la opción elegida y, finalmente, justificando la elección de la localización ideal de la banda extensiométrica.

4.1 Análisis de los resultados

Una vez concluida la preparación del modelo se lleva a cabo el cálculo de las simulaciones, incluyendo todas las hipótesis de simplificación que se han descrito anteriormente.

En primer lugar, se comprobará la validez de las hipótesis de simplificación comparando los resultados obtenidos en cada caso. Para ello se tomarán valores de los elementos de la región central en la que el mallado es más fino para obtener una mayor precisión.

	Muestra completa	Simplificación un medio	Simplificación un decimotavo
Tensión radial (Mpa)	3.54	3.48	3.45
Tensión circunferencial (Mpa)	3.54	3.46	3.45
Tensión Von Mises (Mpa)	3.54	3.47	3.45
LE Radial	0.37	0.36	0.36

Tabla 7. Tensiones en las distintas simplificaciones

Tal y como se puede observar en la tabla 7 las tensiones analizadas en la zona central de la muestra en las distintas hipótesis similares, aunque se observan pequeños cambios en los valores de tensiones de la muestra completa con respecto a las dos simplificaciones.

Además de observar los valores de las tensiones en dirección radial en la zona de estudio se va a analizar la distribución de estas a lo largo de toda la muestra para observar si existen variaciones significativas en la forma en la que se distribuye la tensión en los distintos modelos.

Para empezar, se muestran los resultados obtenidos para la simulación de la muestra completa. En la figura 37 se puede observar la distribución de tensiones en dirección radial

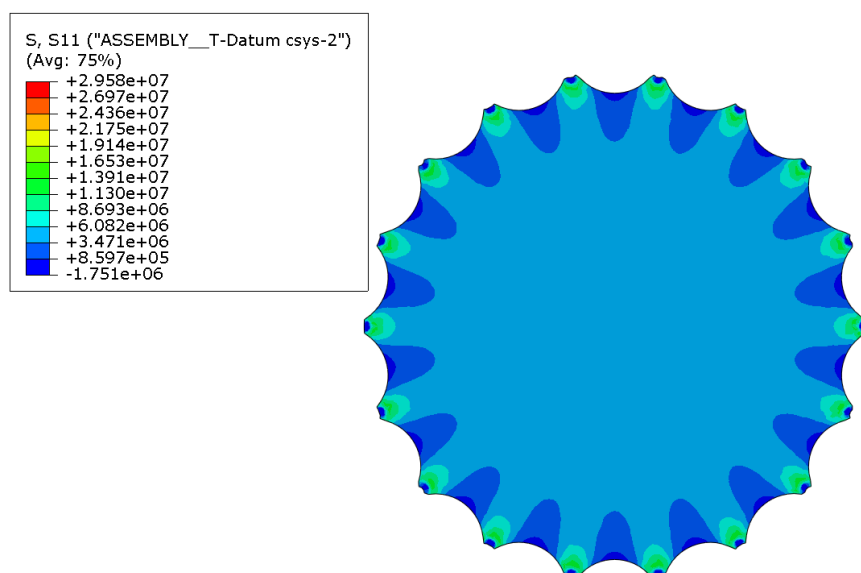


Figura 37. Distribución de tensiones en dirección radial

A continuación, en la figura 38, se muestra la distribución que se encuentra en la simplificación a un medio.

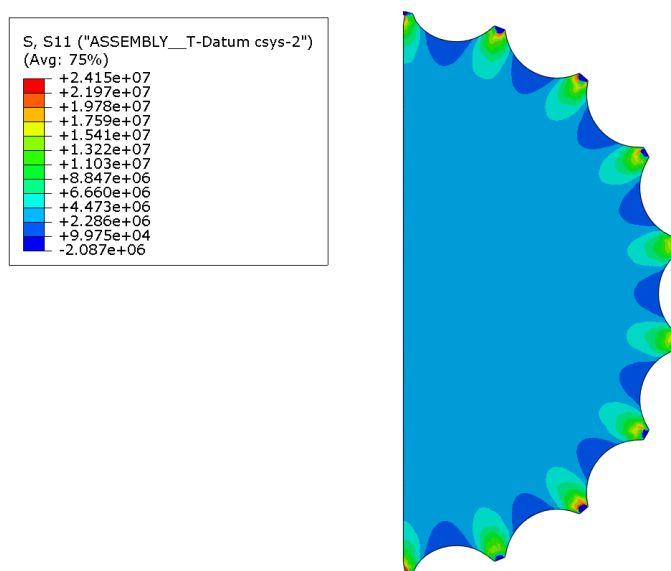


Figura 38. Tensiones radiales simplificación un medio

Por último, en la figura 39, se muestra la distribución en la simplificación de un decimotavo.

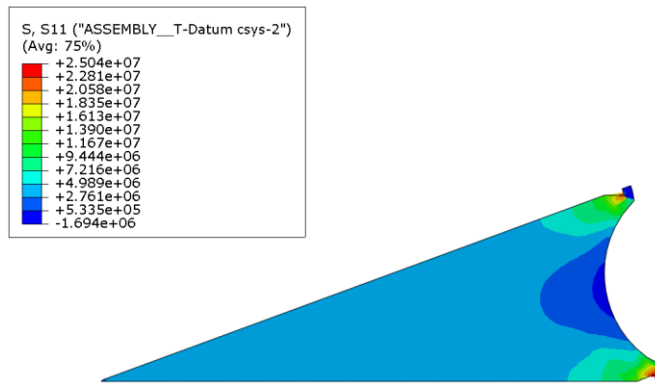


Figura 39. Tensiones radiales simplificación un decimotavo

A la vista de las figuras anteriores se puede observar que la distribución de las tensiones radiales a lo largo de la muestra sigue el mismo patrón. Aunque en las regiones próximas a los puntos de aplicación se pueden observar ciertas variaciones en los valores máximos de la tensión. Estas variaciones pueden deberse a pequeñas diferencias en el mallado y a la aplicación de las condiciones de simetría.

Una vez analizados los resultados de cada simplificación, se comprobará la mejora que se consigue en el coste computacional mediante las distintas simplificaciones del problema que se han llevado a cabo. En la siguiente gráfica podemos observar los tiempos de cálculo de cada simulación, teniendo en cuenta que para poder realizar un estudio comparativo se ha igualado el tamaño de la malla en todos los modelos. Los datos de tiempo han sido extraídos del archivo en formato. Log que genera *Abaqus* al realizar cada simulación.

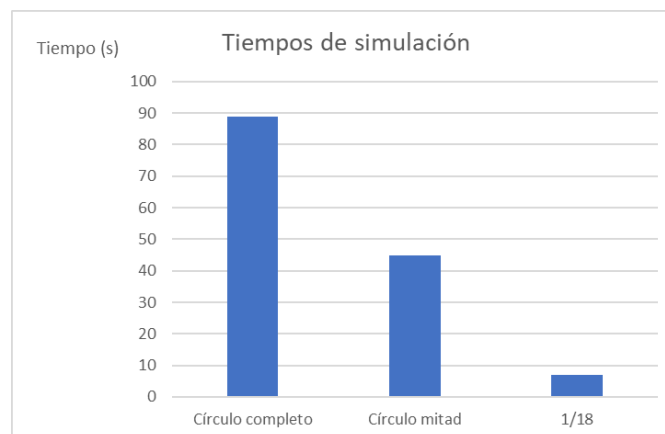


Figura 40. Tiempos de simulación

Tal y como se predijo en un primer momento, el tiempo disminuye al simplificar el modelo mediante simetría. Obteniendo una mejora en términos relativos muy significativa. Además, la reducción del tiempo sigue una tendencia prácticamente lineal como se observa en la figura 41.

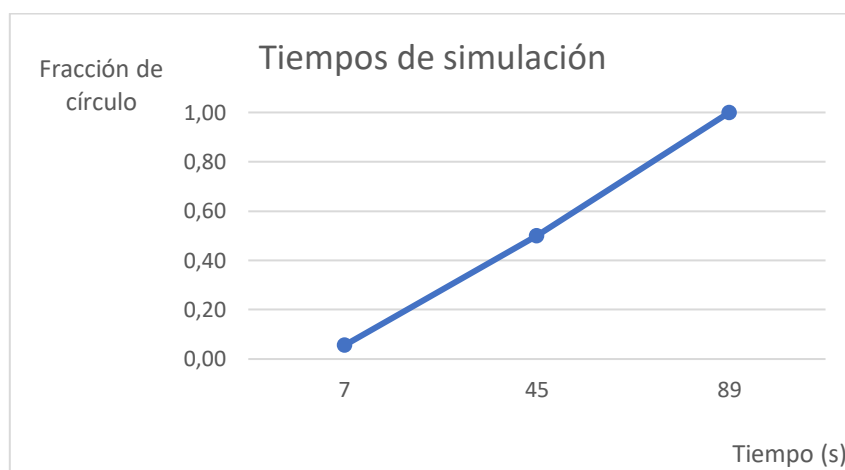


Figura 41. Tendencia de los tiempos de simulación

A la vista de los resultados obtenidos con cada simplificación y de la mejora conseguida en el coste computacional se decide utilizar la muestra completa para realizar el resto del análisis. Esta elección se debe a que, pese a que la mejora de los tiempos en términos relativos es muy grande, el tiempo total de simulación para la muestra es relativamente bajo por lo que en nuestro caso se considera que no es necesario utilizar las simplificaciones geométricas. Sin embargo, cabe destacar que en caso de utilizar un modelo que tenga un mayor coste computacional o se requiera un mallado con un mayor número de elementos, estas simplificaciones son perfectamente válidas y se recomienda su uso para optimizar recursos.

A continuación, se realiza un estudio de las tensiones radiales a lo largo de una línea horizontal, que atraviesa diametralmente la muestra uniendo dos puntos de aplicación. El objetivo de realizar este análisis es determinar qué zonas están afectadas por la aplicación puntual de las fuerzas.

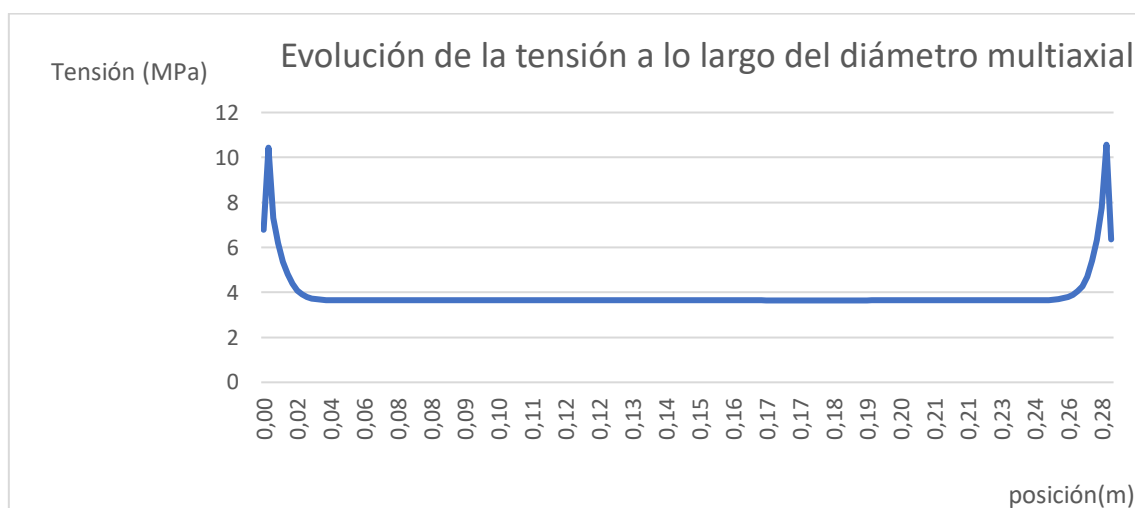


Figura 42. Evolución de la tensión a lo largo del diámetro

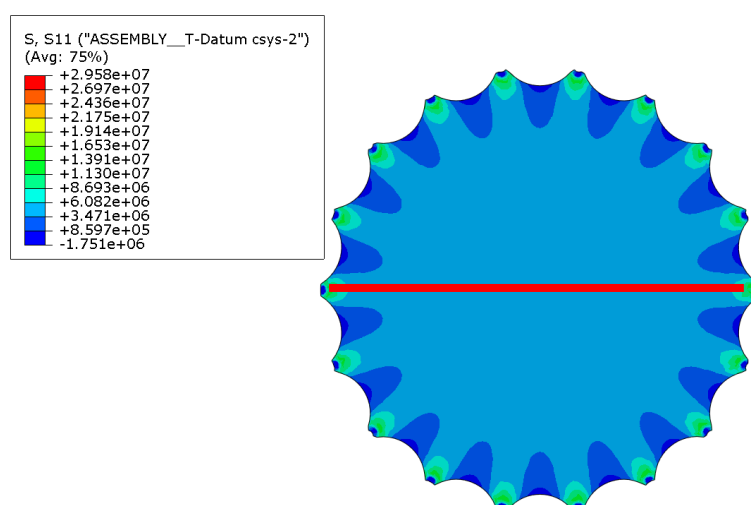


Figura 43. Detalle de la recta objeto de ensayo

Como se puede observar en la gráfica de la figura 42 en los extremos se encuentran valores de tensión muy elevados que coinciden con los puntos de aplicación de los desplazamientos. Sin embargo, con forme nos alejamos de estos puntos encontramos una distribución homogénea de las tensiones tal y como describe de manera teórica el principio de Saint-Venant. Este estudio nos permite saber a partir de que regiones la tensión es homogénea y por tanto válida para obtener datos.

A continuación, se realizará un estudio similar, pero aplicando un desplazamiento únicamente uniaxial.

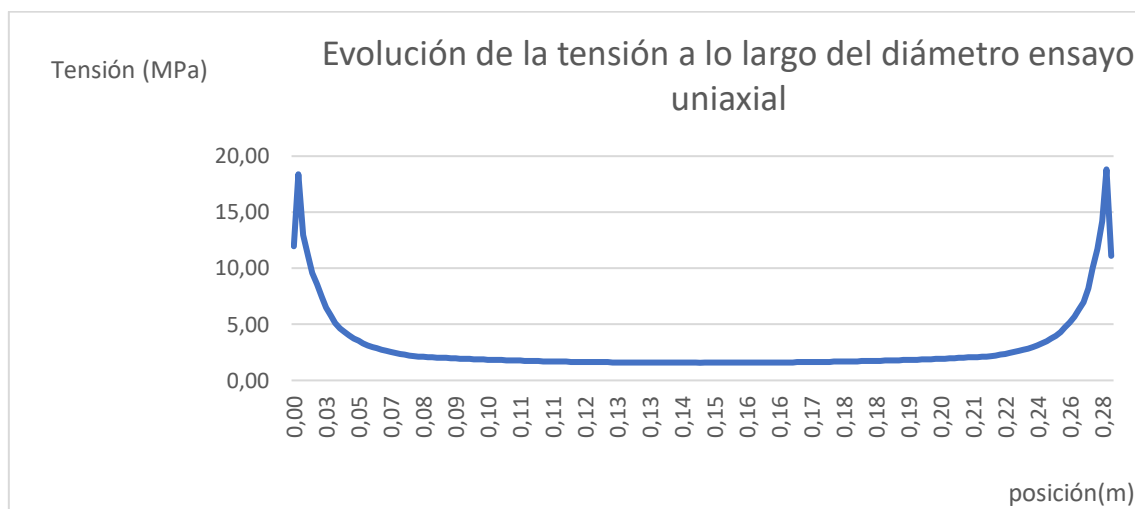


Figura 44. Evolución de la tensión a lo largo del diámetro ensayo uniaxial

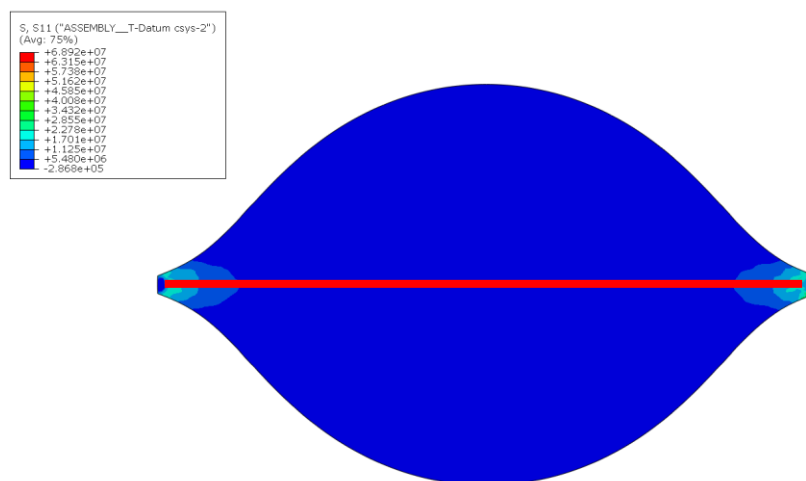


Figura 45. Detalle de la recta objeto de ensayo

Como se puede observar en la figura 44 en este caso se observa un patrón similar al obtenido en el ensayo equiaxial, con la diferencia de que en este caso la tensión no llega a ser estable en ningún momento. Esto puede deberse a que la muestra al ser circular tiene una sección variable a lo largo del diámetro, siendo máxima en el centro de la muestra en el que se observa que la tensión es mínima. Por lo tanto, para ensayos de este tipo se recomienda utilizar muestras de forma rectangular.

El último análisis de la muestra se centra en el cálculo de la máxima expansión a la que se puede someter antes de alcanzar su tensión de rotura. Para ello se ha realizado una simulación imponiendo un gran desplazamiento y se ha extraído una gráfica que relaciona la máxima tensión con la expansión a la que se somete la muestra, figura 46.

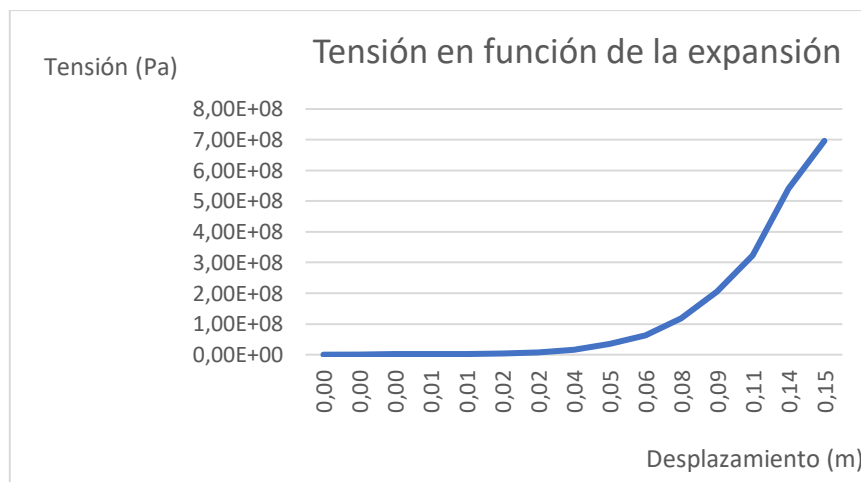


Figura 46. Tensión en función de la expansión

Observando la figura 46 y sabiendo que la tensión de rotura de esta materia es de 32 MPa [15] obtenemos un valor de expansión radial máxima para nuestra muestra de 0.055 m.

Una vez concluido el análisis de la muestra es necesario analizar el dispositivo de ensayo y su comportamiento ante los esfuerzos a los que se ve sometido durante un ensayo. Para ello se han extraído los valores de fuerzas que se generan en los puntos de anclaje en función del alargamiento en un ensayo equiaxial, figura 47, y en un ensayo uniaxial, figura 48.



Figura 47. Fuerza en el caso equiaxial



Figura 48. Fuerza en el caso uniaxial

El valor máximo de fuerza obtenido se introduce en el modelo de la pieza de soporte para analizar la integridad en un caso crítico y seleccionar el mejor emplazamiento para la banda extensiométrica. Una vez realizada la simulación se obtiene la distribución de tensiones que se muestra en la figura 549.

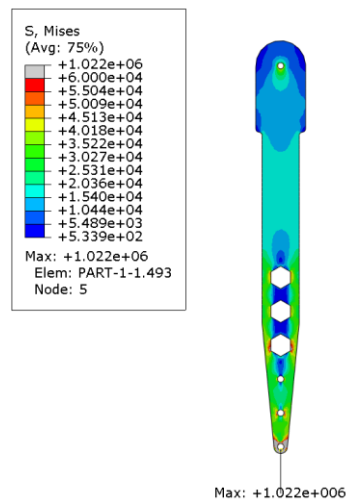


Figura 49. Distribución de tensiones en el soporte

Como se puede observar se producen concentraciones de tensiones en los alrededores de los vaciados, especialmente en los hexagonales debido a que los vértices de los hexágonos son puntos de concentración de tensiones. Sin embargo, tal y como se observa en la figura 49 la tensión máxima alcanzada es de 1.022 MPa, inferior al límite elástico del metacrilato que a temperatura ambiente se sitúa en 62MPa [14]. Por tanto, podemos dar por válida la hipótesis inicial por la que hemos considerado el metacrilato como un sólido elástico.

En cuanto a la posible ubicación de la banda extensiométrica, el principal requisito es que el punto en el que se ubique tenga una distribución de tensiones lo más uniforme posible y que físicamente sea posible su colocación. Teniendo en cuenta estas dos premisas se ha decidido proponer su ubicación en la zona que se muestra en la figura 50.

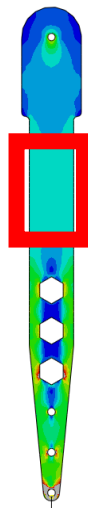


Figura 50. Localización de la banda extensiométrica

Por último, queda comprobar que el cuerpo de la máquina es capaz de soportar los esfuerzos a los que está sometido. Para ello se introducen los mismos valores de fuerzas que se han utilizado en la estructura de soporte, puesto que estas fuerzas se transmiten de la muestra a los soportes y de los soportes a la estructura.

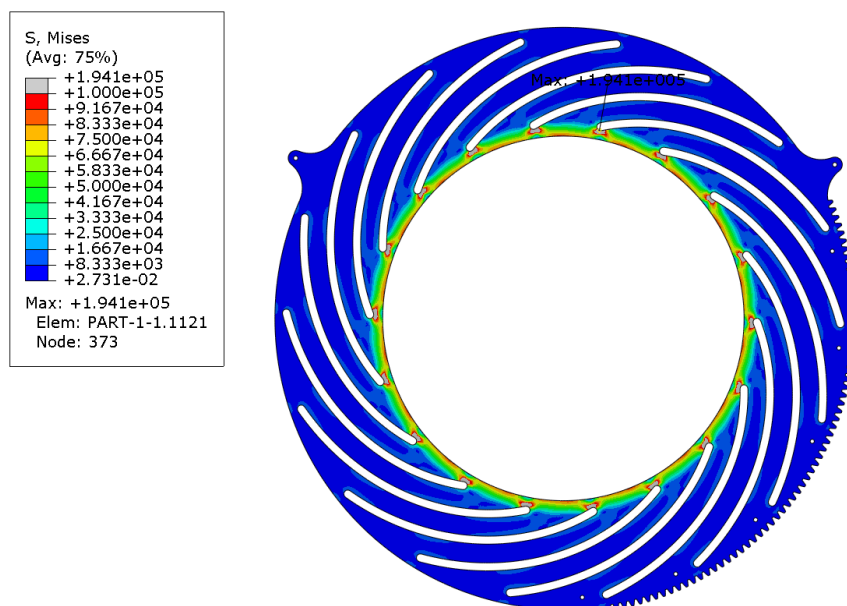


Figura 51. Tensiones en el cuerpo del dispositivo

Como se puede observar en la figura 51 la tensión máxima que se genera en la estructura al aplicar el estado de cargas es de 0.19 MPa, muy inferior al límite elástico del metacrilato y se generan alargamientos máximos de 4.36×10^{-8} m que, en nuestro caso, se pueden considerar despreciables, por lo tanto, la estructura de la máquina de ensayos se puede considerar adecuada.

5. CONCLUSIONES Y PROPUESTAS DE INNOVACIÓN

En este apartado se expondrán las conclusiones que se extraen después de analizar los resultados obtenidos y se propondrán futuras vías de estudio.

5.1 Conclusiones

El objetivo principal de este trabajo es la realización de un estudio de las cargas y la validación del diseño de una máquina de ensayos multiaxiales para sólidos hiperelásticos estudiando tanto el comportamiento de la máquina como el del material de muestra, el diseño de un nuevo sistema de sujeción de las muestras y la búsqueda de una ubicación ideal para la colocación de una banda extensiométrica que permita obtener los resultados experimentales.

Después de realizar los cálculos pertinentes se concluye:

- La estructura del dispositivo de ensayo mantiene su integridad estructural y posee la rigidez requerida para no alterar los resultados del ensayo.
- La muestra de material permite aprovechar toda la capacidad de expansión de la máquina sin que se generen fracturas.
- El diseño del sistema de sujeción permite un rápido y cómodo proceso de preparación del ensayo y la realización de ensayos uniaxiales.
- La ubicación de la banda extensiométrica resulta óptima y permitirá obtener lecturas precisas al encontrarse en una zona de fácil instalación y en la que la distribución de tensiones es uniforme.

5.2 Propuesta de innovación

Después de finalizar este trabajo se propone llevar a cabo la construcción final de la máquina en la que se debería incluir algún dispositivo que permita recopilar los valores de los sensores y realizar representaciones gráficas de la tensión frente a la deformación, además de permitir la expansión de la muestra controlada en todo momento. Debido a que es relativamente sencillo y económico de implementar se propone utilizar una placa Arduino y un motor paso a paso que se encargue del giro que permite la expansión de la muestra.

Una vez automatizada la máquina y teniendo la posibilidad de obtener datos de los ensayos se propone utilizar técnicas DIC (digital image correlation), para medir desplazamientos y, por lo tanto, deformaciones mediante el uso de imágenes tomadas a la muestra. Esto nos permitiría corregir el modelo incrementando su precisión para los distintos materiales ensayados.

Además, sería interesante realizar ensayos con otros tipos de materiales que permitan crear una base de datos que, posteriormente, pueda utilizarse como referencia para futuros estudios.

Un dato que sería útil conocer es el cambio de espesor que se produce en el material durante el ensayo para ello es necesario desarrollar algún método que permita detectar dicho cambio que, a priori, resulta difícil de medir.

Experimentalmente se ha detectado que, pese a que se realiza un correcto apriete de los tornillos que componen la estructura, estos tienden a perder agarre. Esto puede ser debido a vibraciones o a dilataciones que pueda experimentar el cuerpo de la máquina. Para solucionarlo se propone cambiar el material de construcción por acero inoxidable sobre el que se puede ejercer un mayor par de apriete permitiendo una unión más sólida. Este cambio en el material de la estructura principal no invalidaría los resultados obtenidos puesto que el acero mejoraría las propiedades mecánicas del metacrilato y tal y como se ha demostrado las deformaciones sufridas con la estructura de metacrilato ya eran muy bajas hasta el punto de poder considerarse despreciables.

6. ENTORNO SOCIOECONÓMICO

En este apartado se expondrán los costes derivados de la realización de este trabajo, así como sus posibles contribuciones a la sociedad.

6.1 Presupuesto

1. Autor: Jorge Rodríguez Cabrero.

2. Departamento: Mecánica de medios continuos y teoría de estructuras.

3. Descripción del proyecto:

Título: Evaluación mediante simulación numérica de un dispositivo de ensayo multiaxial para sólidos hiperelásticos.

Duración: 6 meses.

4. Desglose presupuestario:

GASTO EN PERSONAL	Nombre y apellidos	Tiempo (horas)	Coste unitario (€/hora)	Coste total (€)
Ingeniero Senior	Jesús Pernas Sánchez	30	100	3000
Ingeniero Senior	Álvaro Vaz Romero Santero	15	100	1500
Ingeniero Junior	Jorge Rodríguez Cabrero	300	25	7500
Presupuesto total del personal				12000

Tabla 8. Gasto en personal

GASTO EN EQUIPOS	Unidades	Coste total (€)	Dedicación (meses)	Coefficiente máximo	Coste imputable (€)
Ordenadores	3	3000	6	50%	1500
Licencia Catia Student	1	100	6	21%	21
Licencia Simplify 3D	1	150	6	5.00%	7.5
Licencia Abaqus	3	25000	2	33%	1375
Presupuesto total de equipos					2903.5

Tabla 9. Gasto en equipos

GASTO DE IMPRESIÓN	Coste (€)
Material	0.3
Amortización	1.5
Presupuesto total	1.8

Tabla 10. Gasto en impresión

5. Presupuesto total:

Coste total	
Gasto en personal	12000
Gasto en equipos	2903.5
Gasto de impresión	1.8
Costes indirectos (20%)	2981.06
PRESUPUESTO TOTAL (€)	17886.36

Tabla 11. Coste total

6.2 Impacto socioeconómico

Tras finalizar este trabajo se realiza un estudio del impacto socioeconómico y medio ambiental.

Este trabajo tiene una gran componente teórica que permite mejorar la comprensión del comportamiento de este tipo de materiales ante diferentes estados de carga. Por lo que se estudiará el impacto que tendrían los resultados del estudio aplicados en casos prácticos.

Desde el punto de vista socioeconómico un mejor conocimiento de las propiedades de los sólidos hiperelásticos posibilitará implementar en un futuro mejores modelos que permitan predecir el comportamiento del tejido arterial. Esto permitirá valorar al personal médico de manera más efectiva los riesgos de intervenciones que tengan relación con el tejido arterial. Permitiendo que se pueda llegar a simular la resistencia de una arteria y las deformaciones a las que se vería sometida al exponerse a un determinado esfuerzo mecánico.

Además, teniendo en cuenta que uno de los principales usos de este tipo de materiales es la elaboración de juntas, una mejora de la comprensión del comportamiento de este tipo de materiales puede dar lugar a una evolución en el diseño de las juntas reduciendo las fugas que se producen, con el consiguiente impacto ambiental.

El uso de este tipo de materiales es también predominante en la elaboración de neumáticos por lo que los resultados obtenidos en este y futuros estudios puede tener una gran aplicación en este campo.

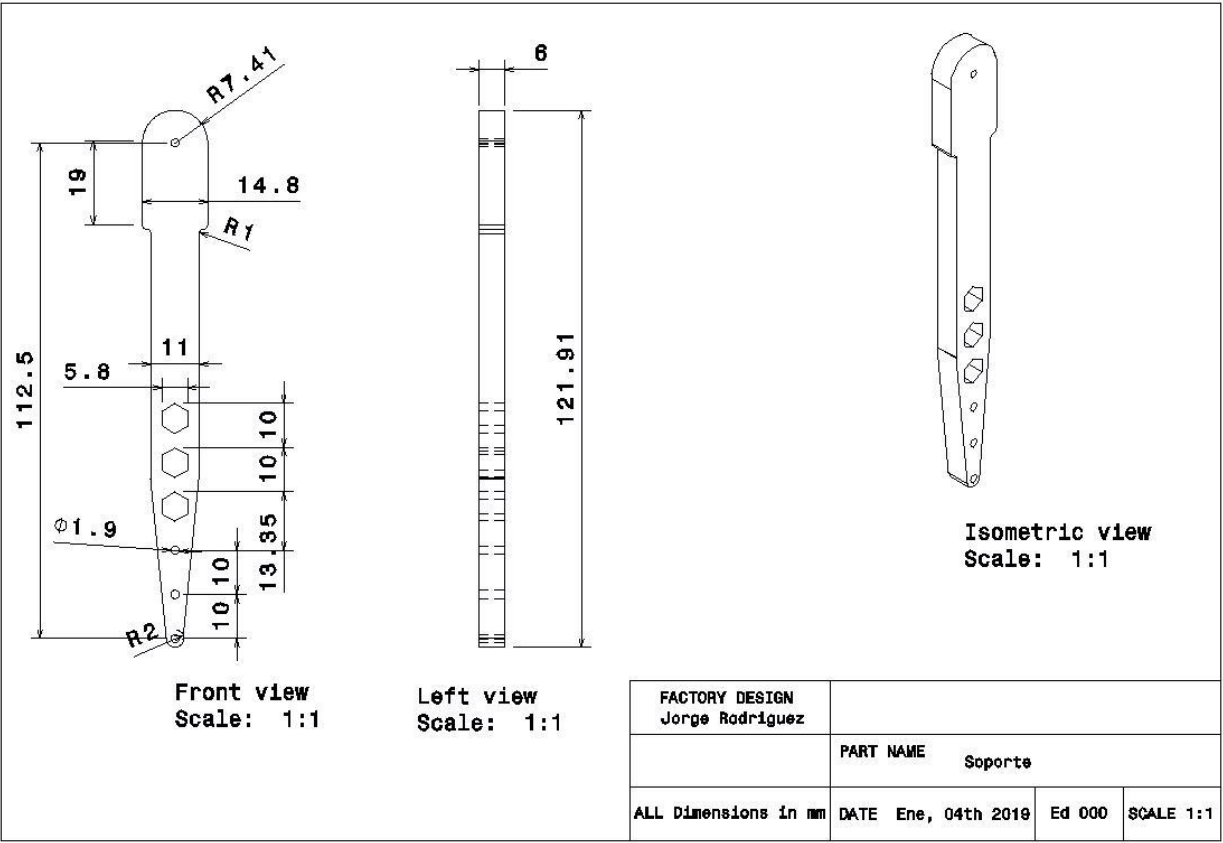
7. BIBLIOGRAFÍA

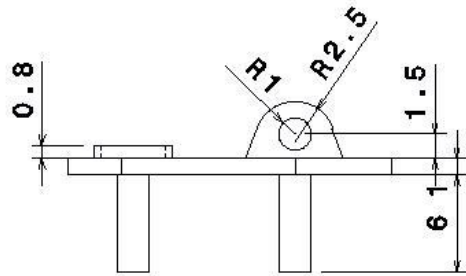
- [1] Virtual, T. (2019). *¿Para qué sirve la junta homocinética?* [En línea] Actualidad Motor. Available at: <https://www.actualidadmotor.com/la-junta-homocinetica/> [Último acceso: diciembre 2018].
- [2] Contenidos.bupasalud.com. (2019). *Angioplastia Coronaria*. [En línea] Available at: <https://contenidos.bupasalud.com/salud-bienestar/vida-bupa/angioplast%C3%ADa-coronaria> [Último acceso: diciembre 2018].
- [3] Bergström, J. (2015). *Mechanics of solid polymers*. 1st ed.
- [4] emaze presentations. (2019). S14 BQV QUIMICA II_ACT.03_CONTENIDO MACROMOLECULAS SINTETICAS. [En línea] Available at: <https://www.emaze.com/@AICCRZIL> [Último acceso: diciembre 2018].
- [5] Universidad Carlos III de Madrid, *Apuntes de ciencia e ingeniería de materiales*, Madrid, 2017.
- [6] Upv.es. (2019). *Unidad 15. Materiales Poliméricos y Compuestos*. [En línea] Available at: https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm15/fcm15_6.html [Último acceso: diciembre 2018].
- [7] Álvarez, R. (2019). *Volkswagen prueba ya las ruedas de fibra de carbono*. [En línea] Autobild.es. Available at: <https://www.autobild.es/noticias/volkswagen-prueba-ya-las-ruedas-fibra-carbono-257391> [Último acceso: diciembre 2018].
- [8] Universidad Carlos III de Madrid, *Apuntes de tecnología de materiales*, Madrid, 2018.
- [9] Tecnologiadelosplasticos.blogspot.com. (2019). *Poliisopreno (Caucho natural y sintético)*. [En línea] Available at: <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/07/poliisopreno-caucho-natural-y-sintetico.html> [Último acceso: diciembre 2018].
- [10] Thomasvillelatexmattresses.com. (2019). *The Truth About "Natural" Latex*. [En línea] Available at: <https://thomasvillelatexmattresses.com/truth-about-natural-latex> [Último acceso: diciembre 2018].

- [11] J. J. Benito Muñoz, R. Álvarez Cabal, F. Ureña Prieto, E. Salete Casino, E. Aranda Ortega (2014): *Introducción al Método de los Elementos Finitos*, UNED, Madrid, 2014.
- [12] Somap.jku.at. (2019). *RADIAL STRETCHING SYSTEM / Scientific Open Source/Hardware Test Equipment*. [En línea] Available at: <http://www.somap.jku.at/rss/> [Último acceso: diciembre 2018].
- [13] HBM. (2019). *Artículo: ¿Cómo funciona un transductor de fuerza?* [En línea] Available at: <https://www.hbm.com/es/6697/como-funciona-un-transductor-fuerza-en-realidad/> [Último acceso: diciembre 2018]
- [14] Ub.edu. (2019). *Polimetil metacrilato*. [En línea] Available at: <http://www.ub.edu/cmematerials/es/content/polimetil-metacrilato> [Último acceso: diciembre 2018].
- [15] Prediction of energy release rate in crack opening mode (mode I) for filled and unfilled elastomers using the Ogden model Mohammed El Yaagoubi, Daniel Juhre, Jens Meier, Thomas Alshuth, Ulrich Giese (2017)
- [16] 1.75mm, P. (2019). *PLA INGEO 3D850 Plata 1.75mm / LEON3D*. [En línea] LEON3D. Available at: <https://www.leon-3d.es/producto/pla-ingeo-3d850-plata-1-75mm/> [Último acceso: enero 2019]
- [17] Scielo.org.mx. (2019). [En línea] Available at: <http://www.scielo.org.mx/pdf/imtd/v4n1/v4n1a4.pdf> [Último acceso Diciembre 2019].

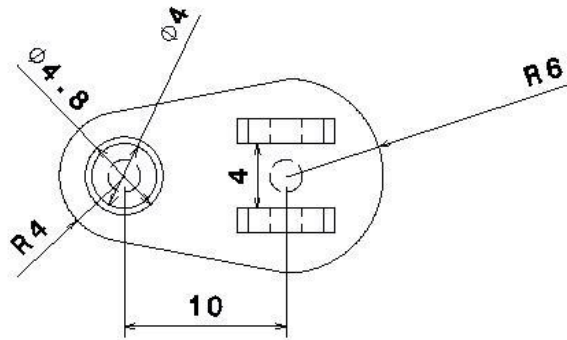
8. ANEXOS

8.1 Planos



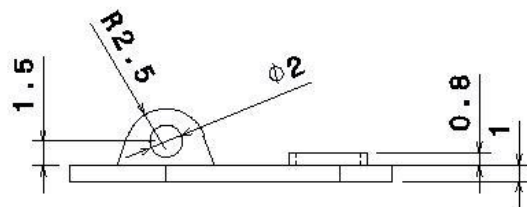


Bottom view
Scale: 3:1

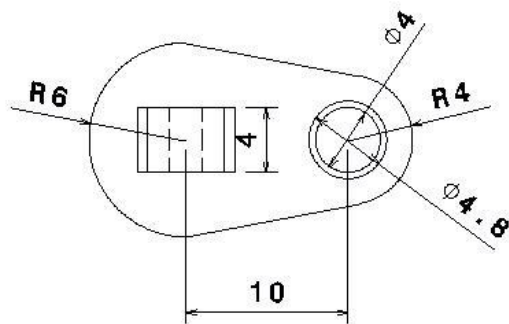


Front view
Scale: 3:1

FACTORY DESIGN Jorge Rodriguez			
	PART NAME Soporte		
ALL Dimensions in mm	DATE Ene, 04th 2019	Ed 000	SCALE 3:1



Bottom view
Scale: 3:1



Front view
Scale: 3:1

FACTORY DESIGN Jorge Rodriguez			
	PART NAME Soporte 2		
ALL Dimensions in mm	DATE Ene, 04th 2019	Ed 000	SCALE 3:1